

零折射率人工电磁媒质理论及其应用

闫雯荻^{1,2}, 李 越^{1,2,3*}

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;
3. 清华大学天基网络与通信全国重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 零折射率(Near-Zero-Index, NZI)媒质因其在电磁波调控中展现出的独特物理特性,近年来成为人工电磁媒质研究的重要方向. 与传统材料不同, NZI 媒质能够在介电常数或磁导率趋近于零的条件下表现出波长无限拉伸、相速度趋于无穷、传播相位不变等特征,进而呈现“时域振荡、空域静止”的时空解耦特性. 这些特性为突破常规器件在尺寸、带宽和形状受限等方面的瓶颈提供了新的物理途径. 本文系统回顾了 NZI 媒质的物理基础、实现机制及典型人工结构形式. 首先从物理机理出发,介绍其波长拉伸、超耦合效应与理想能流特征;随后综述了 NZI 媒质的实现方式,并进一步介绍了近年来发展迅速的“光学掺杂”理论,即通过在 NZI 媒质中引入异质掺杂体实现等效磁导率的精细调控,从而在亚波长尺度上构建 NZI 人工电磁媒质. 该方法具有参数可调、几何无关和易集成等优势,已成为 NZI 媒质工程化的重要手段. 在应用方面,本文从吸收、传输与辐射三个角度总结了 NZI 人工电磁媒质的典型功能与性能优势;在吸收方面,利用 NZI 媒质中的场增强效应、阻抗匹配机制及完美相干吸收,可实现超高灵敏度传感、高效热辐射调控、超薄吸收表面等;在传输方面,利用 NZI 媒质的超耦合效应、阻抗调控能力与色散工程,可实现任意形状的无反射能量传输、高效率可弯曲互连、多端口功率分配以及多通道频分复用等功能器件;在辐射方面,利用 NZI 媒质的几何无关性与零相移特性,可实现波前整形、定向辐射与方向图可重构等功能,构建形状无关、高集成度的可调控天线器件. 目前, NZI 人工电磁媒质仍面临带宽受限、损耗较大与工艺兼容性差等关键挑战. 未来发展方向包括:发展宽带低损耗材料体系,实现结构与模式的协同优化;推动力学、热学、量子等多物理场交叉融合,实现与芯片及光学深度集成等.

关键词: 零折射率媒质;零折射率等效媒质理论;光学掺杂;阻抗匹配;传输线;天线

基金项目: 国家自然科学基金(No.U22B2016);国家重点研发计划(No.2021YFA0716601)

中图分类号: TN015;O441

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)11-4157-14

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

DOI: 10.12263/DZXB.20250732

Near-Zero-Index Metamaterials and Applications

YAN Wen-di^{1,2}, LI Yue^{1,2,3*}

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;

3. State Key Laboratory of Space Network and Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Near-zero-index (NZI) media have emerged as a significant research direction in artificial electromagnetic (EM) media in recent years due to their unique physical properties in EM wave manipulation. Unlike traditional materials, NZI media can exhibit features such as infinitely stretched wavelength, infinite phase velocity, and unchanged propagation phase under conditions where the permittivity or permeability approaches zero. This leads to a spatiotemporal decoupling characteristic described as “temporal oscillation, spatial stillness”. These properties provide new physical pathways to overcome the bottlenecks of conventional devices in terms of size, bandwidth, and shape constraints. This article systematically reviews the physical fundamentals, implementation mechanisms, and typical NZI metamaterials. Starting from the physical mechanisms, this article introduces their wavelength stretching, supercoupling effects, and ideal power flow characteristics. Subsequently, the implementation methods of NZI media are summarized, and the rapidly developing theory of “photonic doping” is further introduced. This theory involves introducing heterogeneous doping elements into NZI media to achieve fine-tuning of the effective permeability, thereby constructing NZI metamaterials at subwavelength scales. This

method offers advantages such as tunable parameters, geometry independence, and ease of integration, making it an important engineering approach for NZI media. In terms of applications, this article summarizes the typical functions and performance advantages of NZI metamaterials from three perspectives: absorption, transmission, and radiation. In absorption, leveraging the field enhancement effects, impedance matching mechanisms, and perfect coherent absorption in NZI media enables ultra-high sensitivity sensing, efficient thermal radiation control, and ultra-thin absorbing surfaces. In transmission, utilizing the supercoupling effects, impedance control capabilities, and dispersion engineering of NZI media enables functional devices such as reflectionless energy transmission of arbitrary shapes, high-efficiency bendable interconnects, multiport power distribution, and multichannel frequency division multiplexing. In radiation, exploiting the geometry independence and zero-phase-shift characteristics of NZI media enables wavefront shaping, directional radiation, and reconfigurable radiation patterns, facilitating the construction of shape-independent, highly integrated tunable antenna devices. Currently, NZI metamaterials still face critical challenges such as limited bandwidth, significant losses, and poor process compatibility. Future development directions include: developing broadband, low-loss material systems to achieve synergistic optimization of structures and modes; promoting interdisciplinary integration across mechanical, thermal, quantum, and other physical fields; and realizing deep integration with chip and optical platforms.

Key words: near-zero-index medium; near-zero-index metamaterials; photonic doping; impedance matching; transmission line; antenna

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No. U22B2016); National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFA0716601)

1 引言

材料是人类科技进步的物质基石,其性能决定了技术演进边界与应用潜力^[1]. 传统材料的物理参数由其原子或分子的本征属性所决定^[2]. 例如,金属的介电常数通常可由经典德鲁德(Drude)模型加以描述^[3],而晶体材料的机械性能则由其晶格结构和排布决定^[2]. 虽然这些天然材料支撑了从工业时代向信息时代的跨越,但其可实现的参数范围有限,调控自由度亦较低,难以满足现代工程对新奇功能(如负折射^[4]、逆向导热^[5]及模拟运算^[6]等)的多样化需求.

为突破传统材料在技术与应用边界上的局限,人工电磁媒质应运而生. 人工电磁媒质通常由人工设计的结构单元按照特定方式排布而成,通过对其几何形状与空间排布的精确调控,可赋予结构全新的电磁学、热学、力学等特性,展现天然材料所不具备的响应,推动前沿应用的发展. 早期的人工电磁媒质大多采用周期结构构建,其特征尺度接近甚至大于工作波长,通常被称为超材料(Metamaterials)^[7,8]. 近年来,零折射率(Near-Zero-Index, NZI)媒质作为一种特殊类型的材料,因其可在亚波长尺度下实现对电磁参数的精细调控,受到了广泛关注^[9,10]. NZI媒质是指一类介电常数或磁导率近零的特殊媒质. 在这类媒质中,电磁波的相速度趋于无穷,波长趋于无限,还表现出“时域振荡、空域静止”的独特特性. 这使得NZI媒质在亚波长尺度上具备高度灵活的调控能力,不仅拓展了人工电磁媒质的设计自由度,也为非周期性结构的实现提供了新思路,进而推动了一系列新型电磁器件的应用^[11-13].

本文针对NZI人工电磁媒质及其在电磁领域的应

用开展系统综述. 首先,梳理了NZI媒质的基本概念与核心物理机制,并介绍了NZI媒质的现有实现方法;其次,介绍了基于光学掺杂的NZI等效媒质理论;第三,从吸收、传输和辐射三个典型方向出发,总结NZI人工电磁媒质在电磁器件中的工程实践与最新进展,涵盖基础机理、结构与性能优势;最后,对该领域未来的发展趋势和亟待解决的关键挑战进行展望,为后续研究提供参考与启示.

2 零折射率人工电磁媒质理论

2.1 零折射率媒质

NZI人工电磁媒质是基于NZI媒质本身实现参数灵活调控的一类结构. NZI媒质是指一类介电常数 ϵ 或磁导率 μ 近零的媒质,可以分为介电常数近零(Epsilon-Near-Zero, ENZ)媒质、磁导率近零(Mu-Near-Zero, MNZ)媒质和介电常数磁导率近零(Epsilon-and-Mu-Near-Zero, EMNZ)媒质^[10]. 根据电磁波在介质中的传播关系,折射率可表示为 $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$. 当相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 趋近于零时,折射率 n 也随之趋近于零,从而使媒质展现出一系列不同于常规介质的奇特电磁现象. 其一,根据媒质中波长的计算公式 $\lambda = \lambda_0/n$,当 n 趋近于零时,介质中的有效波长 λ 将被无限拉伸,趋近于无穷大. 与此同时,相速度满足 $v_p = c/n$,在 n 趋近于零时亦趋于无穷大. 这意味着在有限空间内,电磁波几乎不再累积相位,从而表现为几乎静止的空间分布^[14,15]. 其二,根据亥姆霍兹方程,如式(1)和式(2)所示:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

其中, \mathbf{E} 代表电场, \mathbf{H} 代表磁场. 在 NZI 媒质中, $\epsilon\mu = 0$, 此时电磁场的空间变化因子 $\nabla^2 \mathbf{E}$ (或 $\nabla^2 \mathbf{H}$) 与时间变化因子 $\partial^2 \mathbf{E}/\partial t^2$ (或 $\partial^2 \mathbf{H}/\partial t^2$) 两者互相解耦, 即时域和空域不相干, 我们称之为时空解耦 (Spatiotemporal decoupling) 特性, 此时 NZI 媒质表现出“时域振荡、空域静止”的独特特性^[16,17]. 基于两种独特特性, 零折射率媒质展示出了诸多奇特的物理现象, 赋能多个电磁器件.

在 NZI 媒质中, 由于其无限拉伸的波长与趋于无穷大的相速度, 电磁波在传播过程中表现出独特的超耦合效应^[18,19]. 所谓超耦合, 是指电磁波能够在不产生反射和相移的情况下穿过由 NZI 媒质填充的狭窄通道, 如图 1(a) 所示. 与常规介质不同, 在常规波导中尖锐转角或极窄通道通常会引起强烈反射, 而在 NZI 媒质中, 当通道截面趋近于零时, 其反射系数可消失, 从而实现全透射传输^[20,21]. 值得注意的是, 这一特性与通道体的具体几何形状无关, 仅依赖于通道的截面积、填充介质的磁导率以及输入输出波导的电磁参数, 体现了 NZI 媒质在传输过程中所固有的几何无关特性. 这种几何无关特性可以进一步地拓展到谐振腔设计中, 如图 1(b) 所示. 对于填充了 NZI 媒质的谐振腔, 其谐振频率完全由谐振腔尺寸决定, 而与谐振腔的几何形状无关^[22]. 相比之下, 传统谐振腔的谐振频率通常依赖于具体的几何尺寸与边界条件, 因此难以实现这种形状独立性. NZI 媒质的空间均匀相位分布还可以在量子力学领域加以应用, 如图 1(c) 展示的选择性地支持非辐射模式与辐射模式^[23]等.

当 NZI 媒质同时满足等效磁导率与等效介电常数

近零, 即处于 EMNZ 状态时, 还具备奇特的理想能流特性^[24,25]. 在任意媒质中, 电磁波的功率流用坡印廷矢量 \mathbf{S} 描述. 对于一个以 $e^{-i\omega t}$ 为时谐因子的时谐场, 其坡印廷矢量的旋度和散度可以用式 (3) 和式 (4) 描述:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = -\frac{\omega}{2} (\epsilon_0 \epsilon'' |\mathbf{E}|^2 + \mu_0 \mu'' |\mathbf{H}|^2) + i(\epsilon_0 \epsilon' |\mathbf{E}|^2 + \mu_0 \mu' |\mathbf{H}|^2) \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{S} = \frac{1}{2} [(\mathbf{H}^* \cdot \nabla) \mathbf{E} - (\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{H}^* + \mathbf{E} (\nabla \cdot \mathbf{H}^*) - \mathbf{H}^* (\nabla \cdot \mathbf{E})] \quad (4)$$

其中, $\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon''$ 为相对介电常数, $\mu_r = \mu' + i\mu''$ 为相对磁导率. 由式 (3) 可知, 当 ϵ_r 和 μ_r 均趋向于零时, 坡印廷矢量的散度为零; 同时, 在 NZI 媒质中, 电场和磁场始终保持垂直, 且磁场保持均匀同向谐振. 根据式 (4), 坡印廷矢量的旋度为零, 即在 NZI 媒质中坡印廷矢量的旋度和散度均为零, 这与流体力学中的理想流体^[26] 情况十分类似, 我们称之为理想能流. 如图 1(d) 所示. NZI 媒质中的理想能流特性赋予了电磁波可以绕过传播中的障碍物的特性, 赋能复杂场景下的电磁波传输. 总的来说, NZI 媒质凭借波长拉伸、时空解耦、几何无关传输以及理想能流等独特特性, 为突破传统电磁器件在尺寸、形状和能量传输方面的限制提供了全新物理机制. 然而, 天然材料难以同时满足介电常数或磁导率近零的条件, 这限制了其在实际工程中的广泛应用. 为此, 人们提出并发展了 NZI 人工电磁媒质的概念, 通过人造结构实现可调的介电常数与磁导率, 从而将这些奇特物理效应可控地引入到天线、传输线和谐振器等多种电磁器件设计中.

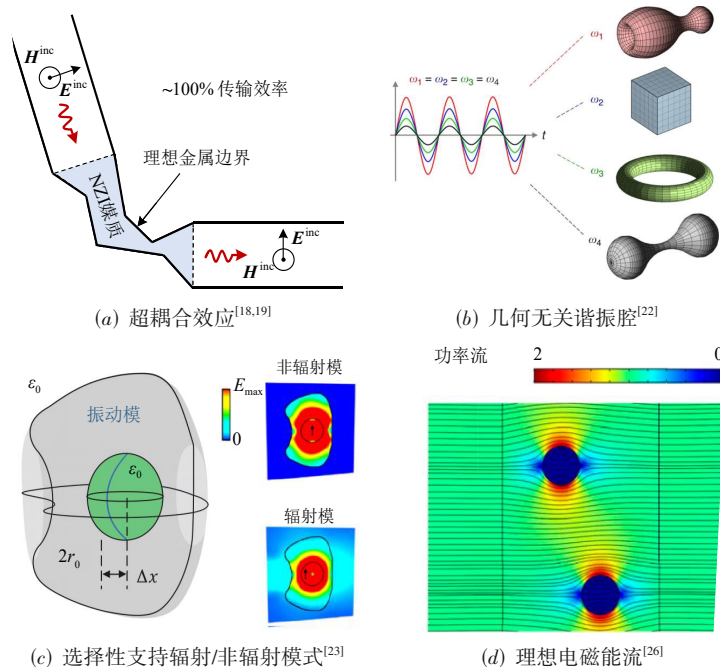


图 1 NZI 媒质的特性

2.2 零折射率媒质的实现方案

NZI 媒质的实现主要依赖两类途径,包括天然 NZI 材料^[27,28]与等效 NZI 媒质^[29-34]. 首先,天然的包括工作在等离子频率附近的金属^[35]或极化材料^[36]. 例如,工作在可见光或者近红外波段的金属,如图 2(a)所示. 当频率逐渐升高时,介电常数的实部随频率升高由负变正,并跨过一个零点. 在这个零点附近,金属表现介电常数近零特性. 然而,这种天然的材料只能在固定的频段实现零折射率响应,其由材料本身性质决定. 此外,这类材料在零折射率工作点附近通常具有较大的虚部,由此引入了极大的损耗,这是材料的天然特性决定的^[37,38]. 为解决这两个问题,研究人员提出了一系列人工结构,用以实现等效 NZI 媒质.

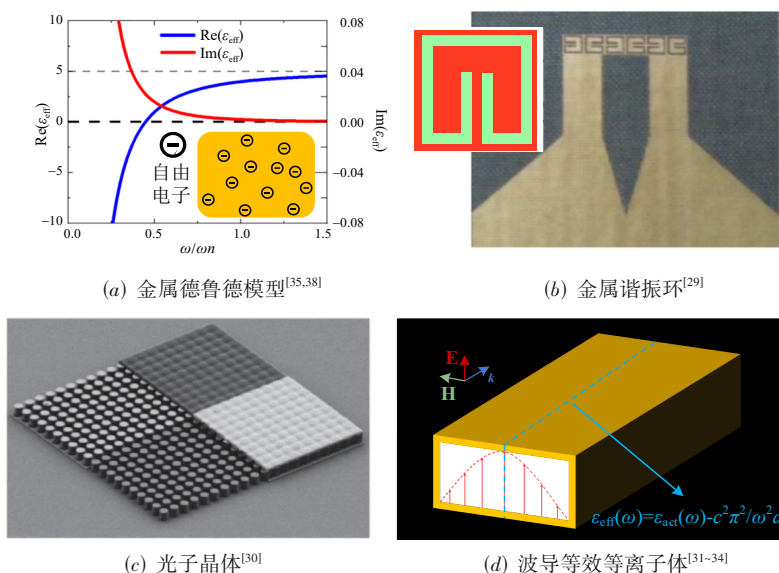


图2 NZI媒质的实现

2.3 零折射率人工电磁媒质与光学掺杂理论

NZI 人工电磁媒质是一类通过人工结构,在 NZI 媒质中实现电磁特性可调的电磁功能媒质. 2017年,来自美国宾夕法尼亚大学的 N. Engheta 教授团队提出了“光学掺杂 (photonic doping)”方法,为零折射率媒质中的参数调控提出了一种灵活途径^[41],如图 3(a)所示. 在二维 ENZ 媒质中,通过引入少量具有其他介电常数的杂质,此时整体 ENZ 媒质表现出对外界的等效响应,如式(5)所示:

$$\mu_{\text{eff}} = 1 + \sum_d \Delta\mu_d, \varepsilon_{\text{eff}} = 0 \quad (5)$$

其中, ε_{eff} 代表 ENZ 背景的等效介电常数, μ_{eff} 代表此时等效 ENZ 媒质的磁导率,而 $\Delta\mu_d$ 代表单个掺杂体对整体媒质的等效磁导率贡献. 通过这种方式实现的等效磁导率如图 3(b)所示. 通过合理设计掺杂体参数,可获得多种极端等效响应. 例如,在谐振频率附近,体系可以

实现等效 NZI 媒质有多种不同的结构类型. Cheng 等人^[29]提出金属谐振环可以在谐振频率附近模拟近零折射率特性,如图 2(b)所示. Li 等人^[30]提出通过周期性排布的光子晶体,也可以等效地实现近零折射率媒质,如图 2(c)所示. 此外,矩形金属波导和平板波导在截止频率附近也可以呈现出 ENZ 特性,如图 2(d)所示^[31-34]. 对于一宽边为 d 的金属矩形波导,其主模为 TE_{10} 模,当工作频率为 $f_c = 0.5 cd$,即工作在截止频率附近时,波导等效为 ENZ 媒质. 由于波导结构具有低损耗、低泄漏等优势,因而在电磁领域有着广泛应用. 此外,基于人工传输线结构^[39]、等效电路^[40]等方式,也能实现 NZI 媒质. 在这些 ENZ 媒质的实现方法后,再通过光子掺杂等方式,对其磁导率进行调节,就实现了 NZI 人工电磁媒质.

表现为等效完美磁导体. 此外,可同时实现等效磁导率和等效介电常数均近零的 EMNZ 状态,实现阻抗匹配与零相移透射. 此外,“光学掺杂”还具有几何无关特性^[42],使得其在复杂、可形变结构以及亚波长尺寸中同样适用. 通过这种方式,研究人员实现了人为控制磁导率,在亚波长尺度上实现了 NZI 人工电磁媒质的概念. 在本文中, NZI 人工电磁媒质指在 NZI 媒质的基础上进一步调控实现等效电磁参数的方法. 针对人工实现的 NZI 媒质,我们称为“基于波导的 NZI 媒质”“基于光子晶体的 NZI 媒质”等.

基于光学掺杂与 NZI 人工电磁媒质理论,研究人员进一步开展了一系列工作,如图 3(c)所示. Zhou 等人为了克服传统光学掺杂方法难以与平面化电路集成的限制,提出了介质集成光学掺杂方法,将掺杂结构嵌入到基于印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 加工的基

于集成波导的 NZI 媒质中,实现了低成本、易集成的 NZI 功能器件^[43,44]. 在工作^[45]中,Yan 等人将经典 Fano 共振理论引入 NZI 人工电磁媒质中,实现了多种不同线

型的等效磁导率和传输谱线调控^[45],如图 3(d)所示. 此外,Coppolaro 等人提出了非厄米的光学掺杂理论^[46]、Yan 等人提出了传输型光学掺杂理论^[47]等.

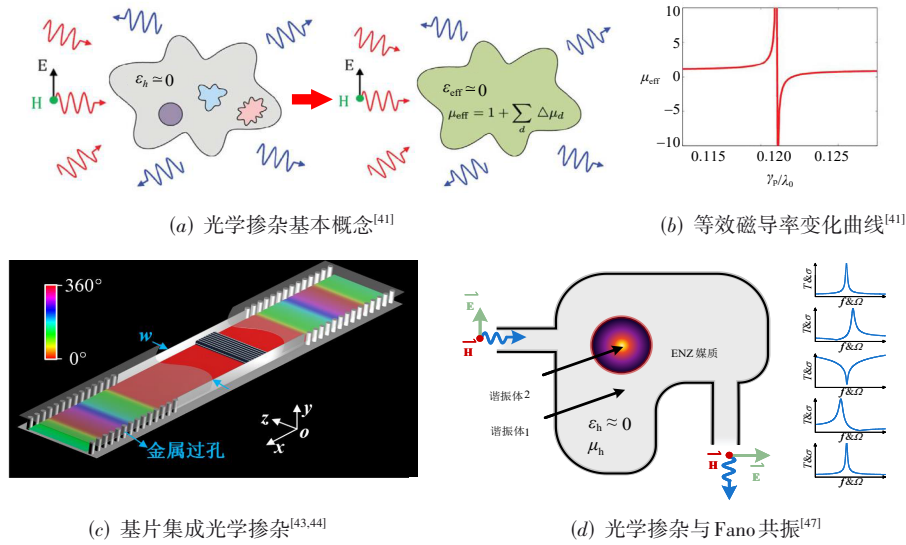


图 3 光学掺杂与 NZI 人工电磁媒质

NZI 人工电磁媒质面临的最主要问题为损耗问题. 这是由于其极强场增强效应^[48],极大地放大了介质中的损耗,使得 NZI 人工电磁媒质整体效率下降. 例如,在 Liberal 等人^[41]的工作中,实验的传输效率约为 50%;在 Zhou 等人^[43]的工作中,实验的传输效率约为 60%. 解决 NZI 人工电磁媒质损耗的方法通常分为模式方法和材料方法两类. 模式方法是指通过不同方式,降低原有 NZI 人工电磁结构中的场增强效应,从而提高工作效率. 例如,Yan 等人^[47]提出了一种“传输式掺杂”的方法,原有的贝塞尔谐振模式替换成了一个由电磁波透射和反射相互叠加的模式,极大地扩展了工作面积,并通过实验实现了约 80% 的传输效率;Dong 等人^[49]设计了一个基于连续体束缚态(Bound State in the Continuum, BIC)的 NZI 光子晶体薄膜,实验实现的面内损耗低至 0.15 dB/mm. 材料方法是指利用低损耗的材料代替现有结构中的高损耗材料,从而提升整体的结构效率. 在微波频段,金属是相对损耗较低的材料. Yan 等人^[50]提出了一种全金属的 NZI 人工电磁媒质结构,同样实现了 80% 的传输效率. 在光学频段,介质是相对损耗较低的材料. Dong 等人^[51]提出了一种基于介质的 NZI 超波导结构,传播损耗比之前的 NZI 波导低两个数量级. 通过这些方法,研究人员实现了 NZI 人工电磁媒质结构,并极大地降低了损耗. 目前,NZI 人工电磁媒质已在多类电磁应用中展现出独特优势.

3 零折射率人工电磁媒质的应用

NZI 人工电磁媒质目前已发展出多样化的应用形

态. 按照工作频段,NZI 人工电磁媒质可以划分为微波、太赫兹、红外及可见光等不同波段,不同波段下的实现方式与实现功能各有侧重. 按照功能属性和物理机制可以分为以能量耗散为主的吸收类应用、以能量传输为主的传输类应用以及以能量辐射与整形为主的辐射类应用. 本文从吸收、传输、辐射三个方面,综述 NZI 人工电磁媒质的具体应用,并在叙述中描述各应用的具体应用场景,系统阐述其典型实现方式及性能优势.

3.1 零折射率人工电磁媒质的吸收应用

3.1.1 通过场增强效应实现增强吸收应用

零折射率人工电磁媒质的物理机制共有三类,分别为前文中所提到的场增强效应^[48]、通过阻抗匹配实现吸收增强^[52]以及相干完美吸收^[53]. 本小节首先介绍通过场增强效应实现的吸收应用. 根据文献^[48],一个放置在 ENZ 背景媒质中的介质柱的场增强因子如式(6)所示:

$$\zeta_H = \frac{2\eta_0}{\pi k_0 r_d} \frac{1}{|\eta_d J_0'(k_d r_d) H_0(k_0 r_d) + \eta_0 J_0(k_d r_d) H_0'(k_0 r_d)|} \quad (6)$$

其中, $J_0(x)$ 和 $H_0(x)$ 是零阶贝塞尔函数和第一类汉开尔函数, η_0 和 k_0 是真空波阻抗和传播常数, η_d 、 k_d 和 r_d 是介质柱的波阻抗、传播常数和半径. 在谐振频率附近,公式(6)的分母趋向于零,代表其场增强效应可以接近于无穷大. 这种场增强效应极度地放大了介质柱中的固有损耗,从而实现了极致的吸收. 利用这种机制,Yan

等人^[50]提出了一种基于 NZI 人工电磁媒质的传感器. 该传感器利用嵌入 NZI 媒质中的金属层空腔作为高 Q 值 LC 谐振结构, 如图 4(a) 所示. 将被测材料置于空腔间隙内, 通过其介电常数变化引起的谐振频率漂移实现高灵敏度探测. 该传感器可实现约 11.2% 的灵敏度和高达 2 800 的品质因数, 相较于传统无源方法实现的传感器(灵敏度 0.67%, 品质因数 515), 该方法实现的性能指标有显著提升^[50]. Liberal 等人^[54]提出利用 NZI 人工电磁媒质中的吸收效应实现热能转换与调控, 如图 4(b) 所示. 在这项工作中, 内部谐振粒子与 ENZ 背景的耦合在其表面产生近乎均匀且显著增强的电磁场分布, 从而极大提高了热辐射与吸收的效率. 此外, 这种增强吸收还表现出高度方向性, 实现了热流调控. Dong 等人^[55]提出利用场增强效应赋能的吸收, 可以实现近红外波段的光电转换和高灵敏度探测. 通过将硅薄膜放置在 ENZ 材料表面, 提高了硅对于光的吸收效率, 从而实现极限的光电探测, 用作高灵敏度光电传感器和单光子传感器. 综上所述, 基于场增强效应的吸收应用能够在多种波段和不同功能场景中实现显著的吸收性能提升, 涵盖传感、热能转换、光电探测、非线性调制及光催化等方向.

3.1.2 通过阻抗匹配实现增强吸收应用

除场增强外, NZI 人工电磁媒质还可通过另一类物理机制——阻抗匹配实现增强吸收, 进一步拓展其在高效能量耦合与损耗控制方面的潜力^[56-59]. 通常而言, 介质的阻抗可以由式(7)描述:

$$\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon} = \eta_0 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \quad (7)$$

其中, $\eta_0 = 377 \Omega$ 是真空中波阻抗. 在 NZI 人工电磁媒质中, 可以通过人为调节实现介电常数与磁导率近零, 即使得材料工作于 EMNZ 状态, 其介质阻抗呈现“0/0”型的不定值状态. 在这种情况下, NZI 电磁媒质可以匹配任意外部系统的阻抗. 通过将外部入射阻抗与吸收材料阻抗匹配, 可以实现完美的电磁波吸收. Lobet 等人^[56]提出了一种 NZI 人工电磁媒质结构, 将其和石墨烯复合在一起, 如图 4(c) 所示. 该结构自上而下依次为入射空气、石墨烯片、介质隔离层以及 NZI 人工电磁媒质结构. 石墨烯层直接与入射波作用, 依靠其面电导损耗将电磁能量转化为热能, 从而实现吸收; 下方的 NZI 人工电磁媒质由亚波长金属单元周期阵列构成, 几何参数经过精确设计, 实现入射波与吸收层的阻抗匹配. 该结构在保持极薄厚度的前提下, 可实现近乎 100% 的吸收效率. 类似工作也被 Pérez-Escudero 等人^[60]报道. 这种阻抗匹配实现的吸收表面经常被用作“隐身斗篷”, 如图 4(d) 所示^[57]. Wang 等人^[57]提出, 通过 NZI 人工电磁媒质增强吸收的特性, 外部入射波散射场可被显著抑制, 从而达到“隐藏物体”的效果. Zhang 等人^[61]

提出如果将 NZI 人工电磁媒质的磁导率由一标量改变为行列式值为零的张量, 可以实现对任意涡旋光的吸收和反射. 此类阻抗匹配型超薄吸波器因其轻量化、可调谐和高效吸收的特性, 在电磁隐身及能量屏蔽等工程领域具有广泛的应用前景.

3.1.3 通过零折射率人工电磁媒质实现相干完美吸收

相干完美吸收 (Coherent Perfect Absorption, CPA) 是一种依靠电磁波之间的干涉相消来实验的全吸收现象^[62-64]. 对于一个双端口系统, 其散射矩阵和本征值可表示为式(8):

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} r & t \\ t & r \end{bmatrix}, \quad \lambda_{\pm} = r \pm t \quad (8)$$

其中, r 代表对应端口的反射系数, t 代表对应端口的透射系数. 当某个本征值恰为零时, 对应的本征矢量的入射状态将导致两端口的输出同时消失, 即实现了 CPA 条件. 其物理本质是辐射泄露与材料吸收之间的临界耦合, 等价条件为

$$|r| = |t|, \quad \arg(t) - \arg(r) = \pi \text{ or } 0 \quad (9)$$

在 NZI 人工电磁媒质中, 由于其折射率接近于零, 其传播相位积累极小, 即在任意厚度下均可实现 $\arg(t) - \arg(r) = 0$, 从而实现 CPA 状态^[65,66]. 此外, 可以通过精确设计 NZI 人工电磁媒质的介电常数和磁导率精确调控这种干涉状态. 诸多基于 CPA 的 NZI 人工电磁媒质已经被应用. Kim 等人^[53]提出了一种基于多层 NZI 薄膜的宽带 CPA 策略, 并将其拓展用于多波长全光开关的实现, 如图 4(e) 所示. Bruno 等人^[67]利用 ENZ 薄膜相干入射光实现宽带 CPA, 其可以从全吸收到全透射任意切换, 以实现光控制光功能. Luo 等人^[68]提出了基于人工电磁媒质的 CPA 结构, 利用 NZI 中独特的零相移特性, 采用光学掺杂结构, 可以在保持亚波长结构的同时, 灵活调控系统的干涉条件, 实现对入射波能量的完全吸收, 对光波和微波探测及信号调控具有重要意义. Yan 等人^[58]将这一结构拓展到多输入多输出系统, 通过 NZI 人工电磁媒质与多个输入、输出通道耦合, 实现了 CPA, 如图 4(f) 所示. 在其工作频点附近, 该结构展现出极高灵敏度, 即对微小扰动可以引发剧烈的输出功率变化, 揭示了其在超灵敏传感中的潜在价值. 实现 CPA 状态后, 系统可以实现 100% 的吸收效率. 此外, 传统方法也可以实现 100% 的吸收效率^[65,66]. 基于 NZI 人工电磁媒质的 CPA 的优势在于, 由于 NZI 媒质的传播相位累积极小, 其可以在任意可控频段与尺寸下实现 CPA, 以满足设计者对于电磁器件的需要.

3.2 零折射率人工电磁媒质的传输应用

3.2.1 基于极窄通道超耦合效应实现高能量传输

与 NZI 人工电磁媒质的吸收应用类似, 基于 NZI 人

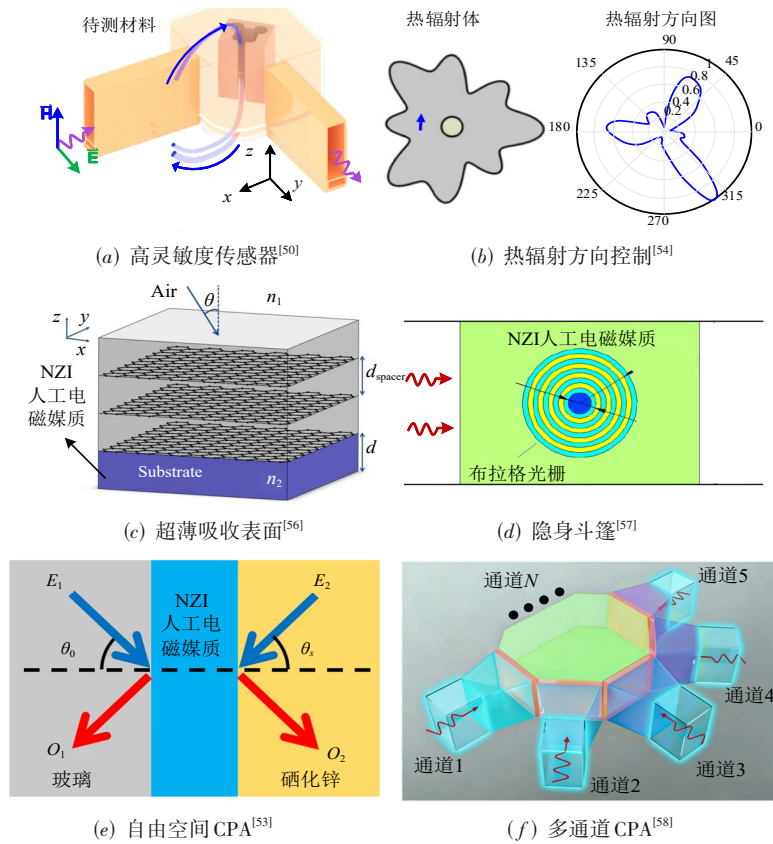


图4 NZI人工电磁媒质的吸收应用

工电磁媒质的传输应用也可根据其物理机制分为三类,包括基于极窄通道超耦合效应的高效能量传输^[18-21]、基于阻抗调控超耦合效应的高效能量传输^[43,47]以及基于模式调控与色散综合的高选择性传输^[45,69,70]。本小节首先介绍基于超耦合效应的高效能量传输。超耦合效应(Supercoupling)是NZI媒质的一个重要特性。当一个截面尺寸远小于波长的通道或狭缝由ENZ材料填充时,电磁波可在其中无衰减地传输,且几乎不受通道形状、长度或弯折的影响^[18,19]。此时,ENZ通道可以等效为一段传输线,根据传输线理论与法拉第电磁感应定律,实现全透射需要保持NZI人工电磁媒质工作在EMNZ状态或采用极窄的NZI人工电磁媒质通道。

Edwards等人^[20]首次在微波波段的矩形波导实验中验证了超耦合效应,如图5(a)所示。在实验中,研究人员将波导中部替换为截面尺寸显著缩小的ENZ填充段,并设计成90°弯曲形状。测试结果表明,入射波在ENZ段中几乎无相位延迟和幅度衰减,实现-4 dB幅度透射,且对弯曲角度和形状变化不敏感。Liu等人^[21]则基于平面互耦环缝谐振器调控NZI媒质的阻抗,在不依赖窄截面填充的情况下,同样实现了超耦合传输,具有更高的集成度。Ali等人^[71]提出了利用超耦合效益实现任意同轴线与波导之间的阻抗匹配和无缝衔接的方法,这对射频/微波系统中的阻抗匹配具有重要应用。

在光频段,Vesseur等人^[72]利用金属-绝缘体-金属结构也实现了相同的效应,如图5(b)所示。实验结果表明,该结构能够在两个光波导之间实现高效率、低反射的超耦合传输,并对通道长度和几何形状变化不敏感,为片上光互连和高密度纳米光子器件集成提供了有效途径。除上述应用外,还可以利用极窄通道超耦合效应实现传感器^[73]等。然而,这种超耦合的实现方法通常需要极窄的通道,这给工程实现增加了难度。对于有限宽度的ENZ通道,传输效率急剧下降^[20,21]。为解决这一问题,研究人员采用调节 $\mu_{r,p}$ 等于零的方式实现超耦合,即基于阻抗调控的超耦合特性。

3.2.2 基于阻抗调控超耦合效应实现高能量传输

除极窄超耦合通道外,另一个实现无反射传输的方法是调控通道中磁导率等于零。基于这一理论,Zhou等人^[43]提出了一种基于基片集成光子掺杂的新型传输结构——电纤,如图5(c)所示。该结构能够在等效EMNZ条件下实现在波导E面的高柔性、任意截面的无反射传输。Yan等人^[47]提出了传输式掺杂的结构,解决了传统谐振式掺杂损耗相对较大的缺点,并提出了在H面可以任意弯曲的电纤,实现测试效率高达80%。此外,将ENZ模式与法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔模式进行叠加,可以进一步拓展超耦合结构的宽带传输能力,并实现波导的交叠^[74,75]。Fu等人^[76]利用像素超

材料的方法,代替原有的光学掺杂理论,可以进一步拓展阻抗调控超耦合效应的带宽. 针对一个任意弯折、可形变的传统波导,其传输效率低于-20 dB^[43],即通过基于 NZI 人工媒质的超耦合效应可以实现超过 15 dB 的能量传输效率提升,这为未来射频、微波、毫米波及太赫兹频段实现宽带、低损耗且可灵活改变的高效传输互联提供了可行方案.

除通过单一模式实现高效率能量传输外,基于阻抗调控的超耦合特性还展示了多端口应用. Zhou 等人^[77]提出并实验验证了一种任意端口数的功率等分网络,如图 5(d)所示. 该设计利用 NZI 人工电磁媒质的几何不敏感超耦合特性,将输入信号无反射地传输至多个输出端口,并通过调节各输出波导的截面宽度,实现任意比例的功率分配. Zhou 等人^[78]提出了基于 NZI 人工电磁媒质通用阻抗匹配方法,实现对通道输入阻抗的连续调控,使其能够与任意负载实现完美匹配. 该技术不仅能够消除由阻抗失配引起的反射,还可以将超耦合机制扩展到多端口、多模式环境下,为构建具备可重构匹配特性的多功能网络提供了可行方案.

3.2.3 基于模式调控与色散综合的高选择性传输

除高效无损地通过具有任意形状通道之外, NZI 人工电磁媒质还展示出模式调控与色散综合应用. 根据 NZI 人工电磁媒质的等效磁导率计算公式,其仅在一个频点附近可以实现 $\mu_{r,p} = 0$, 对应着高效率传输与模式选择,即 NZI 人工电磁媒质具有选择特性,可以实现模式控制. Zhou 等人^[69]证明,当 ENZ 媒质中同时集成了多个掺杂异质体,这些掺杂异质体之间互相不耦合,如图 5(e)所示. 研究人员设计了一个同时集成了三个掺杂异质体的 NZI 人工电磁媒质通道,其支持三个模式同时传输. Hong 等人^[70]利用 NZI 人工电磁媒质在毫米波频段实现了五通道的频分复用与解复用,如图 5(f)所示^[70,79]. 输入端口传输一个包含五个频率的宽带复用信号,五个不同的输出端口则用于对各个信号进行分解,实现五路信号的复用和解复用. 此外,通过 NZI 人工电磁媒质实现频分复用的方法也被 Zhou 等人^[80]报道. 因此,通过在 NZI 人工电磁媒质中引入多掺杂体或多端口结构,可以在空间与频率两个维度上实现对多模式、多通道传输的灵活调控.

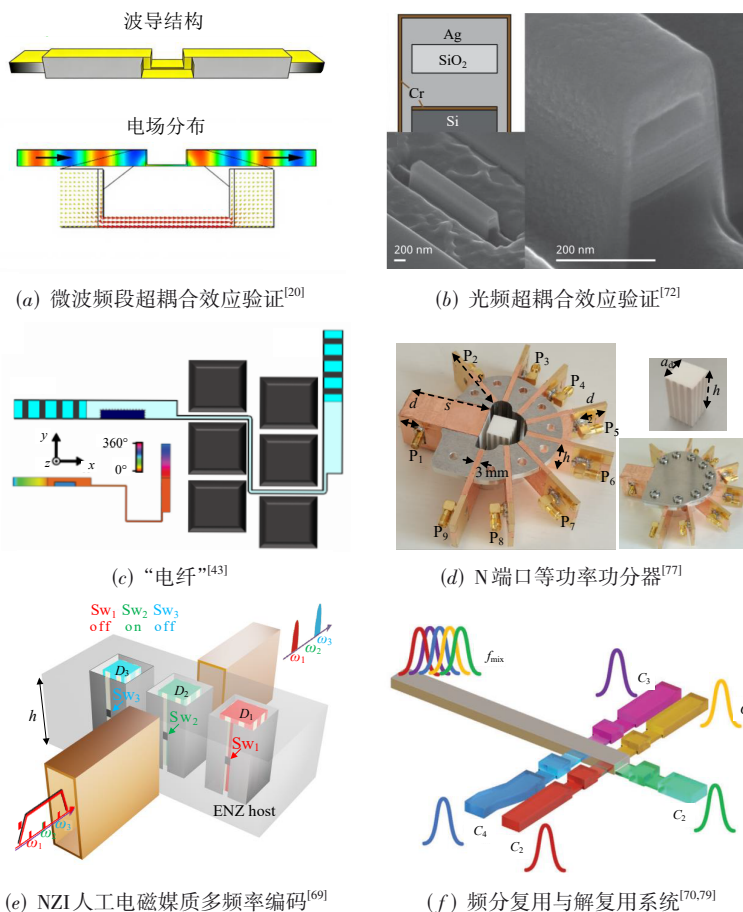


图 5 NZI 人工电磁媒质的传输应用

NZI人工电磁媒质还具有通过色散综合实现高选择性传输的潜力. Yan等人^[45]提出并实验验证了一种基于ENZ媒质中 Fano 共振的色散调控方法. 该方法利用ENZ媒质的拉伸波长特性与局域场分布,在背景磁导率可调的条件下,实现了从负无穷到正无穷范围内的 Fano 参数连续可调,从而获得五种不同的传输谱线. 通过将五种传输谱线进行组合,实现了包括电磁感应透明滤波器和具有高滚降的窄带滤波器两种特殊类型的滤波器. 基于色散综合的选择性传输策略不仅为ENZ媒质提供了新的调控自由度,还为射频、太赫兹乃至光学频段的小型化、高性能可重构器件提供了重要的物理实现途径.

3.3 零折射率人工电磁媒质的辐射应用

3.3.1 波前整形

基于NZI人工电磁媒质的辐射应用主要包括基于NZI人工电磁媒质的波前整形和基于NZI人工电磁媒质的方向图可重构天线两个方面. 前者是对真空中的电磁波进行波前整形,多针对光学频段;后者则直接用作天线辐射,对应微波频段的辐射方向图调控.

NZI人工电磁媒质可以用于波前整形和方向图调控的最主要的原因是其阻抗匹配与几何无关特性. 利用其可以任意匹配入射波的特性,实现对真空中任意入射角度电磁波的阻抗匹配;利用其几何无关特性,改变几何形状,使得波前垂直于几何结构发射. Alù等人^[15,81]系统探讨了NZI人工电磁媒质在电磁源波前调控方面的广泛适用性,如图6(a)所示. 他们提出并分析了利用ENZ材料——包括平面形状、圆柱形状以及更复杂形状来隔离两个空间区域,使输出波前在一个区域中可被精确调控,而与入射波形无关. Moitra等人^[16]提出可以通过光子晶体实现的NZI人工电磁媒质控制

量子辐射,如图6(b)所示. 在1 064 nm激光激励下,量子辐射展示高度定向性,表明了其在量子比特辐射控制方面的潜力. Li等人^[30]提出基于光子晶体实现的NZI人工电磁媒质可以控制光的片上直线传输. Minkov等人^[82]提出通过结合NZI人工电磁媒质和连续体中的束缚态,可以使得零相位平面波前更“干净”,利于高品质的定向辐射和整形.

3.3.2 方向图控制

将前文中的波前调控进一步拓展至微波频段后,可进一步实现辐射方向图可调控天线. Li等人^[83]首次提出几何形状-频率无关的NZI人工媒质天线,如图6(c)所示. 该工作从理论上说明,在天线面积保持不变的前提下,天线的谐振频率仅与NZI人工媒质中的掺杂异质体有关. 在掺杂异质体保持相同的情况下,这些天线具有相同的工作频率,与其几何形状无关,因此称之为形状-频率无关的NZI人工媒质天线. 相比之下,传统天线的谐振频率通常与其几何尺寸直接相关,改变天线长度、宽度或形状都会显著影响工作频率,这使得传统天线在小型化或多频段设计中存在限制. NZI人工媒质天线则通过材料特性而非几何尺寸调控频率,提供了更大的设计灵活性和多功能集成潜力. 在这一思想的指导下,诸多利用NZI人工电磁媒质的天线实现方向图调控的工作得以实现. Zhou等人^[84,85]提出了基于横向截止模式的有效ENZ天线设计方法,如图6(d)所示. 该方法利用工作在截止频率处的基板集成波导实现ENZ响应,同时利用掺杂介质块调控谐振频率,使得天线的工作频率与辐射口间距解耦,可以实现多种不同的方向图,可进一步将直角波导改成圆形波导,实现水平全向方向图^[86]. 此外,NZI人工电磁媒质还被用于宽带微带天线^[87]等. NZI人工电磁媒质实现了谐振频率和辐射方向图的解耦,为天线设计提供了更多的自由度.

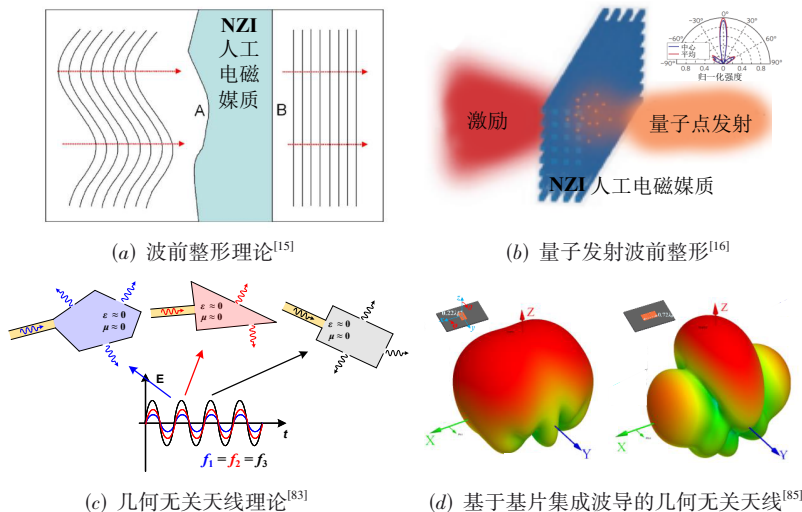


图6 NZI人工电磁媒质的辐射应用

4 总结与展望

4.1 文章总结

本文围绕 NZI 人工电磁媒质的物理基础、实现途径及在微波至光学频段的典型应用开展了系统综述。首先,回顾了 NZI 媒质的基本概念与物理特性,包括波长拉伸、时空解耦、几何无关性以及理想能流等核心机

理,介绍了 NZI 媒质的实现方法,并重点介绍了光学掺杂理论及其在等效磁导率调控中的独特优势;随后,按功能属性将 NZI 人工电磁媒质的应用分为吸收、传输与辐射三大类,并在每一类中结合物理机制、典型结构与性能优势进行了深入分析。为了更清晰地说明基于 NZI 人工电磁媒质的应用概览及其性能提升幅度,利用表 1 对 NZI 媒质进行总结与横向比较。

表 1 NZI 人工电磁媒质应用概览

应用类型	物理机制	器件类型	关键指标	参考文献
吸收应用	场增强效应	微波频段介电传感器	灵敏度 > 11.2% Q 值 > 2 800	文献[50]
	阻抗匹配机制	全吸收超表面	吸收效率接近 100%	文献[56]
			对任意涡旋光,吸收效率接近 100%	文献[61]
	完美相干吸收	宽带全吸收超表面	带宽 1 400~1 700 nm,吸收效率超过 50%	文献[53]
			带宽 1 000~1 200 nm,吸收效率超过 90%	文献[67]
	微波频段折射传感器	灵敏度 > 500%	文献[58]	
传输应用	极窄通道超耦合	形状可变波导传输线	传输效率-4 dB(63%)	文献[20]
			传输效率-4.5 dB(60%)	文献[21]
	阻抗调控超耦合	形状可变波导传输线	传输效率-4 dB(60%)	文献[43]
			传输效率-2 dB(80%)	文献[47]
			带宽 15%,传输效率-2 dB(80%)	文献[74]
	模式调控与色散综合	多模式波导传输线	带宽 20%,传输效率-2 dB(80%)	文献[76]
			三模式传输,传输效率-4 dB(60%)	文献[69]
	窄带、高滚降滤波器	五模式传输,传输效率-1 dB(90%)(光频段)	文献[70]	
辐射应用	辐射方向图调控	方向图可形变天线	峰值效率 90%,-20 dB 矩形系数 1.95	文献[45]
			带宽 1%,方向性 10~15 dBi 可调	文献[83]
			带宽 1%,方向性 7.99~10.2 dBi 可调	文献[84]
		带宽 1%,方向性 6.5~9.1 dBi 可调	文献[85]	
		水平全向天线	带宽 1%,方向性 1.6~3.2 dBi 全向辐射	文献[86]

4.2 面临的挑战

综上所述,尽管 NZI 人工电磁媒质在吸收、传输与辐射等多类应用中展现出优异性能与广阔前景,但在进一步工程化和实用化过程中仍面临带宽、效率与工艺三方面的关键挑战。

带宽方面,多数 NZI 人工电磁媒质依赖波导截止模式、狄拉克锥色散来实现近零折射率特性,这些机制受限于色散斜率较大,导致有效工作频带通常局限在目标频点附近的极窄范围。此外,材料色散也是制约宽带化的重要因素。例如,金属 ENZ 材料同样受限于带宽问题,这对雷达、5G/6G 通信、宽带信号传输等需要同时覆盖多个频段的场景构成制约。

效率方面,NZI 人工电磁媒质内部普遍存在显著的局域场增强效应,使得材料损耗被数百倍甚至上千倍放大,导致吸收、传输或辐射效率降低。在微波与毫米波频段,虽然金属波导等平台本身损耗较低,但在器件尺寸缩小或模式场增强效应提升时,导体损耗与辐射泄漏仍不可忽视;在太赫兹与光学波段,金属的本征电

阻损耗与电子碰撞耗散更为突出,极化介质、半导体等材料在实现 NZI 响应时往往伴随较大虚部介电常数,从而引入显著插入损耗。提升效率需要在模式设计和材料选择上同时发力,以使得工作效率进一步提高。

工艺方面,NZI 人工电磁媒质的电磁响应对几何尺寸、结构周期及材料参数高度敏感。例如,在光学与太赫兹波段,掺杂体面积、薄膜厚度、纳米结构线宽等微小偏差都可能导致零折射率工作点偏移,从而破坏预期的模式匹配与阻抗调控效果。部分结构(如多层膜、亚波长周期超表面)在制备过程中存在误差积累等问题,限制了其可重复性与一致性。同时,NZI 器件需与现有射频或光子集成平台(如硅光、InP、PCB 或 3D 封装)兼容,在保证低剖面、低损耗的同时,还需满足机械稳定性、热稳定性与批量加工成本的要求,这对工艺集成提出了更高的综合性挑战。

因此,如何在保持 NZI 人工电磁媒质核心物理特性的同时,实现宽带化、高效率和工艺的协同优化,成为该领域亟需突破的核心科学与工程问题。针对这些挑

战的有效解决,将直接决定 NZI 人工电磁媒质能否在更高频段、更复杂场景及更大规模系统中实现跨越式发展,并为其在通信、探测、调控及多功能集成等前沿应用的落地奠定坚实基础。

4.3 未来发展方向

面向未来, NZI 人工电磁媒质在材料、学科交叉等方向均具备持续发展的潜力。

材料方面,针对带宽、损耗和工艺兼容,需要从以下几个方向推进。针对带宽问题,需要开发可调色散特性的宽带 NZI 人工电磁媒质。例如,可以通过材料组分优化或有源方法,实现反常色散,以弥补现有 NZI 媒质中德鲁德模型的色散常数,实现宽带性能。同时,可以探索混合介质结构,以拓宽 NZI 人工电磁媒质对不同频段的响应。针对损耗问题,在微波及毫米波频段,可开发温度稳定性高、导电性能优异的金属或导电复合材料,降低导体损耗和辐射泄漏。在太赫兹及光学波段,可利用高迁移率透明导电氧化物、低损耗等离子材料或半导体材料,控制虚部介电常数,从而缓解局域场增强带来的能量耗散问题。针对工艺兼容问题,保证 NZI 人工电磁媒质的可重复性与大规模制备,应优化纳米制造工艺,包括薄膜沉积、微纳刻蚀及自组装技术。同时,材料设计需兼顾机械稳定性和热稳定性,以便与现有芯片封装、PCB 或光子集成平台兼容,确保低剖面、高可靠性及批量加工可行性。

学科交叉方面, NZI 人工电磁媒质有望突破现有电磁学科限制,在力学、热学、量子与光子学应用等领域实现协同设计。在力学领域,将 NZI 特性与可变形材料、柔性结构结合,可实现可拉伸、可折叠的超材料器件,实现力学与电磁功能的协同设计。例如,可开发柔性 NZI 天线、可重构波束调控器件及应变响应型传感器。在热学方向,利用 NZI 媒质的能流操控能力,可实现局部热辐射调控、定向热流管理及热-光耦合器件设计。例如,在热光发射或红外辐射调控中,通过 NZI 超材料实现特定方向的热能集中或抑制,提高系统能效。在量子与光子学应用领域, NZI 腔体可与量子发射体耦合,实现局域密度态调控、相干增强或量子涨落抑制等功能,为低噪声量子传感、超快相干调控及光子集成提供新路径。

综上,随着新材料的不断涌现、新结构设计理念的引入以及先进制造工艺的成熟, NZI 人工电磁媒质有望在光子学、通信、探测、调制、能量管理及多功能集成等前沿领域实现更深远的应用与发展。未来,该领域的突破不仅依赖于电磁理论与器件工程的持续创新,还将受益于材料科学、制造工艺、人工智能优化设计及跨学科融合的共同推动。

参考文献

- [1] ZIMAN J M. Principles of the Theory of Solids[M]. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.
- [2] KITTEL C. Introduction to Solid State Physics[M]. Hoboken: Wiley, 2018.
- [3] DRUDE P. Zur elektronentheorie der metalle[J]. Annalen der Physik, 1900, 306(3): 566-613.
- [4] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [5] CHANG C W, OKAWA D, MAJUMDAR A, et al. Solid-state thermal rectifier[J]. Science, 2006, 314(5802): 1121-1124.
- [6] 付鹏宇, 李越. 基于超材料的模拟计算器件与系统综述[J]. 无线电工程, 2025, 55(4): 831-840.
FU P Y, LI Y. Analog computing components and systems based on metamaterials: A brief review[J]. Radio Engineering, 2025, 55(4): 831-840. (in Chinese)
- [7] 王崧, 董元旦. 基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线[J]. 电子学报, 2023, 51(2): 267-274.
WANG Z, DONG Y D. A hybrid metamaterial-based wide-angle beam-scanning phased array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(2): 267-274. (in Chinese)
- [8] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [9] ENGHETA N. Pursuing near-zero response[J]. Science, 2013, 340(6130): 286-287.
- [10] LIBERAL I, ENGHETA N. Near-zero refractive index photonics[J]. Nature Photonics, 2017, 11(3): 149-158.
- [11] MAHMOUD A M, ENGHETA N. Wave-matter interactions in epsilon-and-mu-near-zero structures[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5638.
- [12] KINSEY N, DEVAULT C, KIM J, et al. Epsilon-near-zero Al-doped ZnO for ultrafast switching at telecom wavelengths[J]. Optica, 2015, 2(7): 616-622.
- [13] YOON J, ZHOU M, BADSHA M A, et al. Broadband epsilon-near-zero perfect absorption in the near-infrared[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12788.
- [14] ZIOLKOWSKI R W. Propagation in and scattering from a matched metamaterial having a zero index of refraction[J]. Physical Review E, 2004, 70(4): 046608.
- [15] ALÙ A, SILVEIRINHA M G, SALANDRINO A, et al. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern[J]. Physical Review B, 2007, 75(15): 155410.
- [16] MOITRA P, YANG Y M, ANDERSON Z, et al. Realiza-

- tion of an all-dielectric zero-index optical metamaterial[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(10): 791-795.
- [17] 李昊. 近零折射率媒质的空时解耦特性及应用[D]. 北京: 清华大学, 2023.
- LI H. Research on the Spatio-Temporal Decoupling Feature of Near-Zero-Index Media and Its Applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2023. (in Chinese)
- [18] SILVEIRINHA M, ENGHETA N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(15): 157403.
- [19] SILVEIRINHA M G, ENGHETA N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using ϵ near-zero metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(24): 245109.
- [20] EDWARDS B, ALÙ A, YOUNG M E, et al. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 033903.
- [21] LIU R P, CHENG Q, HAND T, et al. Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 023903.
- [22] LIBERAL I, MAHMOUD A M, ENGHETA N. Geometry-invariant resonant cavities[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10989.
- [23] LIBERAL I, ENGHETA N. Nonradiating and radiating modes excited by quantum emitters in open epsilon-near-zero cavities[J]. *Science Advances*, 2016, 2(10): e1600987.
- [24] LIBERAL I, LOBET M, LI Y, et al. Near-zero-index media as electromagnetic ideal fluids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(39): 24050-24054.
- [25] LI H, ZHOU Z H, SUN W Y, et al. Direct observation of ideal electromagnetic fluids[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4747.
- [26] KUNDU P K, COHEN I M, DOWLING D R. *Kinematics[M]/ Fluid Mechanics*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 77-108.
- [27] MAIER S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications[M]*. New York: Springer US, 2007.
- [28] WEST P R, ISHII S, NAIK G V, et al. Searching for better plasmonic materials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 795-808.
- [29] CHENG Q, LIU R P, HUANG D, et al. Circuit verification of tunneling effect in zero permittivity medium[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(23): 234105.
- [30] LI Y, KITA S, MUÑOZ P, et al. On-chip zero-index metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 738-742.
- [31] LI Y, LIBERAL I, ENGHETA N. Structural dispersion-based reduction of loss in epsilon-near-zero and surface plasmon polariton waves[J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaav3764.
- [32] ROTMAN W. Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, 10(1): 82-95.
- [33] 何翼景. 基于阻抗表面加载的波导与天线关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- HE Y J. Research on Key Technologies of Waveguides and Antennas Based on Impedance Surface Loading[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021. (in Chinese)
- [34] 孙旺宇. 面向 5G 终端的毫米波天线及波导超构电路研究[D]. 北京: 清华大学, 2023.
- SUN W Y. Research on Millimeter-Wave Antennas and Waveguide Metatronics for 5G Terminals[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022. (in Chinese)
- [35] ORDAL M A, BELL R J, ALEXANDER R W, et al. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(24): 4493-4499.
- [36] NAIK G V, KIM J, BOLTASSEVA A. Oxides and nitrides as alternative plasmonic materials in the optical range[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(6): 1090-1099.
- [37] ZHOU Z H, ZHANG Y J, ZHENG Y L, et al. The low-attenuation endfire leaky-wave state on an optically transparent lossy film[J]. *Engineering*, 2024, 43: 72-80.
- [38] QIN X, SUN W Y, ZHOU Z H, et al. Waveguide effective plasmonics with structure dispersion[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 1659-1676.
- [39] JIANG H T, LIU W W, YU K, et al. Experimental verification of loss-induced field enhancement and collimation in anisotropic μ -near-zero metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(4): 045302.
- [40] KARIM AZIZI M, ELBELLILI T, BAUDRAND H, et al. Transmission line approach of zero-index metamaterials and applications using a wave concept iterative method[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2019, 11(3): 244-254.
- [41] LIBERAL I, MAHMOUD A M, LI Y, et al. Photonic doping of epsilon-near-zero media[J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1058-1062.
- [42] BARDEEN J, SHOCKLEY W. Deformation potentials and mobilities in non-polar crystals[J]. *Physical Review*,

- 1950, 80(1): 72-80.
- [43] ZHOU Z H, LI Y, LI H, et al. Substrate-integrated photonic doping for near-zero-index devices[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4132.
- [44] 周子恒. 介电常数近零媒质的集成光学掺杂理论及应用[D]. 北京: 清华大学, 2022.
- ZHOU Z H. The Theory and Applications of Integrated Photonic Doping of Epsilon-Near-Zero Media[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022. (in Chinese)
- [45] YAN W D, LI H, QIN X, et al. Fano resonance in epsilon-near-zero media[J]. *Physical Review Letters*, 2024, 133(25): 256402.
- [46] COPPOLARO M, MOCCIA M, CASTALDI G, et al. Non-Hermitian doping of epsilon-near-zero media[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(25): 13921-13928.
- [47] YAN W D, ZHOU Z H, LI H, et al. Transmission-type photonic doping for high-efficiency epsilon-near-zero supercoupling[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6154.
- [48] LIBERAL I, LI Y, ENGHETA N. Magnetic field concentration assisted by epsilon-near-zero media[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2090): 20160059.
- [49] DONG T, LIANG J J, CAMAYD-MUÑOZ S, et al. Ultra-low-loss on-chip zero-index materials[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 10.
- [50] YAN W D, ZHOU Z H, LI H, et al. Low-loss epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(8): 2201000.
- [51] DONG T, DAI T X, CHEN Y, et al. Low-loss nanoscale zero-index metawaveguides and metadevices[J]. *Optica*, 2024, 11(6): 799-805.
- [52] SILVEIRINHA M, ENGHETA N. Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(7): 075119.
- [53] KIM T Y, BADSHA M A, YOON J, et al. General strategy for broadband coherent perfect absorption and multi-wavelength all-optical switching based on epsilon-near-zero multilayer films[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22941.
- [54] LIBERAL I, ENGHETA N. Manipulating thermal emission with spatially static fluctuating fields in arbitrarily shaped epsilon-near-zero bodies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(12): 2878-2883.
- [55] DONG Y J, LIANG W Y, QIAN S F, et al. Near-infrared photodetection using an epsilon-near-zero trapping effect in optimized indium tin oxide films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(20): 29923-29932.
- [56] LOBET M, MAJERUS B, HENRARD L, et al. Perfect electromagnetic absorption using graphene and epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2016, 93(23): 235424.
- [57] WANG T T, LUO J, GAO L, et al. Hiding objects and obtaining Fano resonances in index-near-zero and epsilon-near-zero metamaterials with Bragg-fiber-like defects[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(7): 1878-1884.
- [58] YAN D Y, SHALIN A S, WANG Y X, et al. Ultrasensitive higher-order exceptional points via non-Hermitian zero-index materials[J]. *Physical Review Letters*, 2025, 134(24): 243802.
- [59] 吕奇皓, 金城, 田步宁, 等. 超宽角域广义布儒斯特超表面[J]. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(1): 128-145.
- LÜ Q H, JIN C, TIAN B N, et al. Ultrawide-angle generalized Brewster metasurface[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2023, 53(1): 128-145. (in Chinese)
- [60] PÉREZ-ESCUADERO J M, BULDAIN I, BERUETE M, et al. Silicon carbide as a material-based high-impedance surface for enhanced absorption within ultra-thin metallic films[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31624-31636.
- [61] ZHANG R Y, CUI X H, ZENG Y S, et al. Bulk-spatio-temporal vortex correspondence in gyromagnetic zero-index media[J]. *Nature*, 2025, 641(8065): 1142-1148.
- [62] CHONG Y D, GE L, CAO H, et al. Coherent perfect absorbers: Time-reversed lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010. OSA, 2010: QPDA5.
- [63] BARANOV D G, KRASNOK A, SHEGAI T, et al. Coherent perfect absorbers: Linear control of light with light[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(12): 17064.
- [64] WANG C Q, SWEENEY W R, STONE A D, et al. Coherent perfect absorption at an exceptional point[J]. *Science*, 2021, 373(6560): 1261-1265.
- [65] FENG S M, HALTERMAN K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(16): 165103.
- [66] JI W J, WANG D J, LI S C, et al. Photonic-doped epsilon-near-zero media for coherent perfect absorption[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(2): 129.
- [67] BRUNO V, VEZZOLI S, DEVAULT C, et al. Dynamical

- control of broadband coherent absorption in ENZ films[J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 110.
- [68] LUO J, LIU B B, HANG Z H, et al. Coherent perfect absorption via photonic doping of zero-index media[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800001.
- [69] ZHOU Z H, LI H, SUN W Y, et al. Dispersion coding of ENZ media via multiple photonic dopants[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 207.
- [70] HONG B B, SUN L, WANG W L, et al. Five-channel frequency-division multiplexing using low-loss epsilon-near-zero metamaterial waveguide[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(7): 274211.
- [71] ALU A, ENGHETA N. Coaxial-to-waveguide matching with ϵ -near-zero ultranarrow channels and bends[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 328-339.
- [72] VESSEUR E J R, COENEN T, CAGLAYAN H, et al. Experimental verification of $n = 0$ structures for visible light[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(1): 013902.
- [73] ALÙ A, ENGHETA N. Dielectric sensing in ϵ -near-zero narrow waveguide channels[J]. *Physical Review B*, 2008, 78(4): 045102.
- [74] QIN X, LI Y. Superposition of ϵ -near-zero and Fabry-Pérot transmission modes[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16(2): 024033.
- [75] 秦绪. 截止波导的色散特性研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2024.
QIN X. Research on Properties and Applications of Dispersion Characteristics in Cut-Off Waveguides[D]. Beijing: Tsinghua University, 2024. (in Chinese)
- [76] FU P Y, LI P H, LI Y. Bandwidth enhancement of epsilon-near-zero supercoupling with inverse-designed metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(9): 2402014.
- [77] ZHOU Z H, LI Y. N-port equal/unequal-split power dividers using epsilon-near-zero metamaterials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(3): 1529-1537.
- [78] ZHOU Z H, LI Y, NAHVI E, et al. General impedance matching via doped epsilon-near-zero media[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(3): 034005.
- [79] LI P H, YAN W D, WANG S Y, et al. Engineering epsilon-near-zero media with waveguides[J]. *Advanced Physics Research*, 2024, 3(9): 2400070.
- [80] 周子恒, 李越. 基于近零指数超材料的频分复用信息传输[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(6): 905-911.
ZHOU Z H, LI Y. Frequency-division-multiplexing information transmission based on index-near-zero metamaterials[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(6): 905-911. (in Chinese)
- [81] ENOCH S, TAYEB G, SABOUROUX P, et al. A metamaterial for directive emission[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(21): 213902.
- [82] MINKOV M, WILLIAMSON I A D, XIAO M, et al. Zero-index bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(26): 263901.
- [83] LI H, ZHOU Z H, HE Y J, et al. Geometry-independent antenna based on epsilon-near-zero medium[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3568.
- [84] ZHOU Z H, LI Y. Effective epsilon-near-zero (ENZ) antenna based on transverse cutoff mode[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2289-2297.
- [85] ZHOU Z H, LI Y. A photonic-doping-inspired SIW antenna with length-invariant operating frequency[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(7): 5151-5158.
- [86] LIU Z Y, ZHOU Z H, LI Y, et al. Integrated epsilon-near-zero antenna for omnidirectional radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(15): 151904.
- [87] JAFARGHOLI A, MAZAHERI M H. Broadband microstrip antenna using epsilon near zero metamaterials[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(14): 1612-1617.

作者简介



闫雯荻 男, 1999年7月出生于内蒙古自治区赤峰市. 现为清华大学电子工程系博士研究生. 主要研究方向为电磁场与微波技术.
E-mail: ywd21@mails.tsinghua.edu.cn



李越 男, 1984年7月出生于辽宁省沈阳市. 现为清华大学电子工程系副教授、清华大学无穷书院副院长. 主要研究方向为超材料、等离子体元、电磁理论、纳米电路、移动终端天线、MI-MO与分集天线、毫米波天线与阵列等. 中国电子学会会员编号: E190014891S.
E-mail: lyee@tsinghua.edu.cn