

微带线在太赫兹低频段的色散特性分析与实验验证*

徐振^{1)2)#} 罗曼^{1)2)#} 梁博涵¹⁾²⁾ 李吉宁^{1)2)†} 张嘉昕³⁾
王坦³⁾ 陈锴¹⁾²⁾ 徐德刚¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

(2025年5月27日收到; 2025年8月4日收到修改稿)

太赫兹波在通信、生物医学及安检等领域具有重要应用潜力, 但其传输过程中的色散与损耗问题严重制约了系统性能的提升. 微带线作为平面传输线, 具有结构紧凑、易于集成的优势, 但在太赫兹波段的色散特性有待深入研究. 本研究通过理论分析、数值仿真与实验验证相结合的方法, 系统探究太赫兹频段微带线的色散特性及其影响因素. 理论将微带线色散细分为介质色散、几何色散和导体色散, 推导了各色散分量的解析表达式. 实验采用太赫兹时域脉冲反射技术, 对不同基底介电常数、导线宽度及长度的微带线进行测试, 结合数值仿真验证了理论模型的准确性, 并引入脉冲展宽系数对微带线在太赫兹低频段的色散效应进行定量分析. 结果表明: 基底介电常数从 2.2 增至 4.5 时, 色散效应明显增大; 当导线宽度从 100 μm 增至 1600 μm 时, 通过增强几何色散使脉冲展宽系数从 3.18 增至 5.12, 增幅达 38%; 当导体长度从 10 mm 增至 150 mm 时, 则通过累积效应使展宽系数从 2.12 增至 3.18, 增幅为 33%, 与理论模型及仿真结果高度吻合. 本研究为太赫兹微带线的工程设计与结构优化提供了理论依据, 揭示了关键参数对微带线色散特性的调控规律, 对提升太赫兹通信系统带宽与信号完整性具有重要价值, 并为后续开发低色散、高性能太赫兹平面电路奠定了技术基础.

关键词: 微带线, 太赫兹, 色散特性, 脉冲展宽系数

PACS: 42.82.Et, 42.68.Ay, 87.50.U-, 84.40.Az

DOI: 10.7498/aps.74.20250690

CSTR: 32037.14.aps.74.20250690

1 引言

太赫兹波 (terahertz, THz) 作为电磁波谱中连接微波与红外光的特殊频段 (0.1—10 THz), 其波长处于毫米波与红外光之间, 兼具微波与光波的双重特性, 在食品品质^[1-3]、生物医学^[4-6]、安全检查^[7-9]、高速通信^[10-12]、雷达探测^[13,14]、材料化工^[15-17]

等诸多领域展现出广阔的应用前景. 然而, 太赫兹技术的大规模实用化仍面临诸多挑战, 其中太赫兹波在传输过程中的损耗与色散问题, 严重制约了太赫兹系统性能的提升与功能的拓展^[18]. 微带线作为一种平面型传输线, 凭借其易于集成、结构紧凑、加工方便等优势, 在微波与毫米波频段已得到广泛应用^[19]. 随着太赫兹技术的兴起, 将微带线拓展至太赫兹波段, 构建高性能的太赫兹平面电路与

* 国家自然科学基金 (批准号: U22A20123, 62175182, 62275193, U22A20353, 62405214) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jiningli@tju.edu.cn

系统, 成为众多科研人员的研究方向. 但与微波、毫米波频段不同, 在太赫兹波段, 微带线的电磁特性发生显著变化, 其中色散特性尤为关键. 色散特性描述了微带线中电磁波的传播常数与频率之间的关系, 直接影响着太赫兹信号的传输质量与系统带宽.

准确分析和掌握微带线在太赫兹波段的色散特性, 对于优化太赫兹微带线结构设计、提升太赫兹电路性能以及推动太赫兹技术的实用化进程具有重要意义. 关于微带线的传输特性研究, 多集中于微波与低频段的理论分析与实验研究. 2022年, Taiki等^[20]提出了一种用于FR-4基板数值分析的频率相关时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 方法, 充分考虑了基板的色散, 并证明了该方法在FR-4基板中模拟宽带信号传输的有效性和实用性. 2024年, Aditya等^[21]对微带线中的非横电磁模 (transverse magnetic mode, TEM) 对串扰、阻抗和有效介电常数的影响进行分析, 并定义新的起始频率量化高速数字应用中微带传输线中的非TEM色散显著的位置, 表明非TEM色散有显著影响. 在太赫兹波段多集中于微带平面天线的理论与实验研究, 关于在太赫兹波段微带线的色散特性研究较为少见. 2023年, Singh和Awasthi^[22]从保角映射方法出发, 研究低损耗薄膜环烯炔共聚物介质基板上耦合微带线的太赫兹波段的色散特性, 分析了微带线的偶模和奇模的频率相关参数阻抗、有效相对电容率、介电损耗和导体损耗. 2024年, 该研究团队先采用静态谱域分析法计算薄膜介质基板上微带线的导体厚度相关线电容, 然后利用线电容计算微带线的特性阻抗和有效相对电容率, 最后利用色散关系计算频率相关的特性阻抗和有效相对电容率, 并根据传输线集总参数计算频率相关的介电损耗和导体损耗^[23]. 目前, 针对微带线在太赫兹波段的色散特性研究, 虽然已取得一定进展, 但仍存在诸多问题有待深入探索. 理论方面, 传统的微带线理论模型在太赫兹频段的适用性面临挑战. 实验研究中, 由于太赫兹波的产生、探测以及测量技术要求高、难度大, 准确获取微带线在太赫兹波段的色散特性实验数据的准确性和完整性有待提高, 难以全面反映微带线在太赫兹波段的色散特性.

本研究聚焦于微带线在太赫兹波段的色散特性, 旨在通过理论分析与实验研究相结合的方法,

深入探究微带线色散特性的内在机理与影响因素. 一方面, 基于电磁场理论, 结合太赫兹波段微带线的特殊电磁现象, 改进和完善微带线的理论模型, 为太赫兹微带线的设计与优化提供理论依据; 另一方面, 利用先进的太赫兹时域脉冲反射技术, 对不同结构参数的微带线进行色散特性测量, 获取准确可靠的实验数据. 通过理论与实验结果的对比分析, 验证理论分析的有效性, 揭示微带线结构参数、材料特性等因素对色散特性的影响规律, 为太赫兹微带线的工程应用提供技术支持与实践指导, 推动太赫兹技术在更多领域的发展与应用.

2 色散解析与修正

在宽带、高速的微波及太赫兹电路中, 通常要求脉冲信号需要以尽量小的色散进行传输, 微带线作为重要的连接与传输载体, 其传输性能对信号的瞬态特性有着直接影响. 在微波与太赫兹波段中, 由于色散的影响, 不同的频率分量传输速度不同, 会导致传输的脉冲信号发生严重的变形与失真 (例如脉冲展宽), 因此对微带线在太赫兹波段的色散特性展开研究十分重要.

2.1 理论分析

在传统传输线理论中, 虽然微带线与带状线都属于双导体结构的传输线, 但主要传播模式与带状线不同. 带状线由被介质层包裹的中心导带以及两个平行的接地板组成, 电磁场完全限制在两个接地板之间, 具有辐射损耗小、几乎无色散的优势, 主要传播TEM模, 但是其不便与其他器件连接, 在微波有源电路中的应用前景受到限制. 微带线由沉积在介质层表面的金属导线以及接地板组成, 可以看作由平行的双导体传输线演变而来. 如果微带线中的介质材料为空气则主要传输TEM模, 但是在实际的应用中介质材料并非空气. 因此微带线传输电磁波时, 其场分布既需要满足导体表面的边界条件, 又需要满足介质与空气分界面上的边界条件, 导致其电场与磁场的纵向分量均不为0, 因此其传输的是一种混合模式. 当频率较低时, 导线的厚度远小于工作波长, 导线与接地板之间的纵向分量相较于横向分量比较弱, 其模式分布与TEM十分接近, 又称为准TEM模^[24].

为了便于分析,引入有效介电常数 $\epsilon_{\text{effective}}$ 的概念,用于将微带线结构等效为一种均匀的传输介质,分析太赫兹脉冲的传输速度,进而该传输介质的特性阻抗 Z_0 、相移常数 β_0 、工作波长 λ_0 以及脉冲传输速度 v_0 可采用以下公式进行计算:

$$Z_0 = Z_{01}/\sqrt{\epsilon_{\text{effective}}}, \quad (1)$$

$$\beta_0 = \beta_{01}\sqrt{\epsilon_{\text{effective}}}, \quad (2)$$

$$\lambda_0 = \lambda_{01}/\sqrt{\epsilon_{\text{effective}}}, \quad (3)$$

$$v_0 = c/\sqrt{\epsilon_{\text{effective}}}, \quad (4)$$

其中 Z_{01} , β_{01} , λ_{01} , c 分别为空气介质中微带线的特征阻抗、相移常数、工作波长和光速. 为准确分析有效介电常数,根据保角变换法,引入填充系数 γ ,用于表示微带线中金属导线被介质的包裹程度. 当填充系数为 0 时,表示金属导线被空气完全包裹;当填充系数为 1 时,表示金属导线被均匀的介质材料完全填充. 因此微带线的填充系数的取值范围为 0—1,其计算公式如下:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 10h/W}} \right], \quad (5)$$

$$\epsilon_{\text{effective}} = 1 + \gamma(\epsilon_r - 1), \quad (6)$$

其中, h 与 W 分别为介质基底的厚度与金属导线的宽度, ϵ_r 为介质材料的相对介电常数^[24]. 图 1(a), (b) 分别为微带线的整体结构与剖面图. 将 (5) 式代入 (6) 式可得

$$\epsilon_{\text{effective}} = 1 + \frac{(\epsilon_r - 1) \left(\sqrt{1 + 10h/W} + 1 \right)}{2\sqrt{1 + 10h/W}}. \quad (7)$$

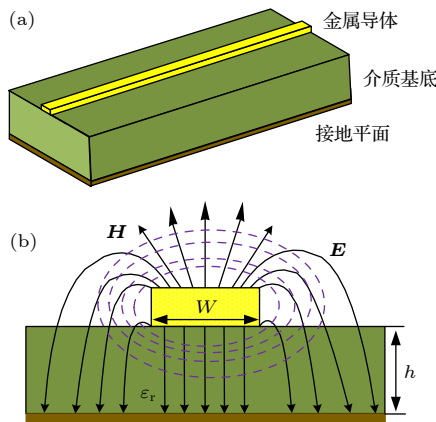


图 1 微带线结构图 (a) 整体结构; (b) 剖面图

Fig. 1. Microstrip line structure diagram: (a) Overall structure; (b) sectional view.

半开放结构的微带线是一种典型的色散传输系统,当其工作频率提高时,由于金属导线与接地板构成了高度为 h 、相对介电常数为 ϵ_r 的平板波导,会出现横电模与横磁模. 为了避免微带线传输电磁波出现此类模式,需要满足 $\lambda_{\min} > 2W\sqrt{\epsilon_r}$. 这里 λ_{\min} 表示最小工作波长. 另外 TM 类表面波模式无条件存在,避免微带线传输系统中不出现此类模式的条件为 $\lambda_{\min} > 4h\sqrt{\epsilon_r - 1}$.

根据上述公式可知,当介质基底材料的参数保持不变时,微带线表面的导线宽度越宽,其特征阻抗越小,则工作波长越小,脉冲的传输速度越慢;当导线的宽度越窄,其特征阻抗越大,则工作波长越长,脉冲的传输速度越快. 在设计微波或太赫兹电路时能够以此为依据进行分析^[25].

2.2 色散解析修正

当电磁波在微带线上传输时,主要色散包括介质色散、导体色散、几何色散,当传输的频率较高时还存在辐射损耗^[26]. 由于交变电场的作用,介质内部的分子会来回运动碰撞,产生热损耗,即介质损耗,且随着频率的升高,分子运动会更加剧烈,进而导致介质损耗增大. 由于接地平面和导线之间的介质为非理想导体,金属导线和地板由于趋肤效应的存在,还会存在表面电流,进而产生导体损耗,该损耗是微带线在微波波段的主要损耗之一. 几何色散是由于微带线的宽度、厚度以及与接地板的距离等几何参数影响其电磁场分布产生的,即不同频率的电磁波在微带线中传播时,因几何结构对电磁场的约束和引导作用不同,因而产生的色散. 另外微带线的金属导体下表面与介质充分接触,但上表面及侧面暴露在空气中,是一种非全封闭的传输导体,因此其导线两侧会向外辐射场,损失部分能量,即辐射损耗^[27]. 当微带线传输的信号频率位于微波波段及太赫兹低频段时,辐射损耗与导体损耗相比可忽略不计,因此在此波段通常不分析辐射损耗. 但是在太赫兹高频波段,由于频率的上升,辐射损耗也逐渐增大,此时产生的辐射损耗不可忽略.

为对微带线的色散进行更精确的阐述,将微带线的色散更加细致地划分为介质色散、导体色散、几何色散进行分析. 微带线的总传播常数受上述三者影响,且以介质色散和几何色散为主,导体色散对总色散的影响可忽略不计.

介质色散主要由基板材料决定,导致有效介

电常数变化, 主导低频到中频信号传输^[28,29]. 根据 Hammerstad-Jensen 模型, 在特定频率下基板材料的有效介电常数为

$$\varepsilon_{\text{effective_sub}}(\omega) = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{\text{effective}}(0)}{1 + (f/f_p)^2}. \quad (8)$$

这里 $\varepsilon_{\text{effective}}(0)$ 为静态有效介电常数, 通常由微带线的尺寸决定:

$$\varepsilon_{\text{effective}}(0) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2} \left(1 + \frac{10h}{W}\right)^{-1/2}. \quad (9)$$

f_p 为色散的转折频率, 标志色散被显著影响的频率点, 根据经验公式计算可得到:

$$f_p = Z_0/(2\mu_0 h), \quad (10)$$

其中 Z_0 为微带线的特性阻抗, μ_0 为真空磁导率. 介质基板的色散对传播常数的影响为

$$\beta_{\text{sub}}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{effective_sub}}(\omega)}. \quad (11)$$

导体色散由趋肤效应引起, 主要影响高频损耗, 导致导体损耗和传播常数随频率变化. 首先对趋肤深度 $\delta(\omega)$ 进行计算:

$$\delta(\omega) = \sqrt{2/(\omega\mu_0\sigma)}, \quad (12)$$

在计算导体损耗引起的衰减常数 $\alpha_{\text{conductor}}(\omega)$ 时, 需要考虑单位长度电阻 $R(\omega)$ 的影响:

$$R(\omega) = 1/(\sigma W \delta(\omega)), \quad (13)$$

$$\alpha_{\text{conductor}}(\omega) = \frac{R(\omega)}{2Z_0}. \quad (14)$$

导体色散对传播常数的影响为 $\beta_{\text{conductor}}(\omega) = \beta_0(\omega) + j\alpha_{\text{conductor}}(\omega)$. 另外传播常数的实部决定相位延迟, 虚部决定所传输信号幅度的衰减. 这里, σ 为导体的电导率, $\beta_0(\omega)$ 为无损耗时的传播常数.

几何色散主要是由微带线的横向场分布随频率变化引起的, 当传输的电磁波为高频信号时, 电磁场更集中于导线的下方, 导致介电常数变化, 因此几何色散对信号的高频部分影响较大, 主要采用 Schneider 模型进行修正^[30]. Schneider 模型是在考虑了微带线中电磁波传播的非准静态效应基础上建立的. 其引入了修正因子来补偿准静态分析的误差, 通过对电磁场方程的进一步推导和修正, 更准确地描述了微带线在较高频率下的色散特性. 该模型综合考虑了微带线的几何结构和介质特性对电磁波传播的影响, 能够更精确地预测微带线的传播常数和相速度等色散参数. 经过修正之后的高

频介电常数为

$$\varepsilon_{\text{effective_geo}}(\omega) = \varepsilon_{\text{effective}}(0) + \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{\text{effective}}(0)}{1 + (f/f_g)^2}, \quad (15)$$

其中 f_g 为几何色散特征频率, 计算公式为

$$f_g = \frac{c}{4h\sqrt{\varepsilon_r - 1}}. \quad (16)$$

几何常数对传播常数的影响为

$$\beta_{\text{geometric}}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{effective_geo}}(\omega)}. \quad (17)$$

综上所述, 传播常数是一个受限于介质特性、导体属性、几何参数等多种因素影响的物理量, 在总色散效应的影响下, 微带线的总传播常数可表示为

$$\beta(\omega) = \beta'(\omega) + \alpha(\omega)j, \quad (18)$$

其中, 传播常数的实部 $\beta'(\omega)$ 主要受介质色散与几何色散影响:

$$\beta'(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{effective}}(\omega)}. \quad (19)$$

传播常数的虚部主要受导体色散和介质色散影响. 由 (19) 式可得

$$\varepsilon_{\text{effective}}(\omega) = (c\beta'(\omega)/\omega)^2.$$

介质色散与几何色散都是导致微带线传输太赫兹脉冲发生展宽的核心物理机制, 其本质是微带线的介质材料与结构参数对电磁波传播特性的频率依赖性. 当电磁波频率从微波逐渐升高到太赫兹波段时, 传输模式逐渐从 TE 模式或 TM 模式过渡, 等效介电常数会随着频率变化, 进而引起传播常数的频率依赖性, 即不同频率分量的群速度不同, 在太赫兹频段, 这种色散效应尤为显著. 因为太赫兹脉冲的宽频谱特性使得不同频率分量在传输过程中经历不同的传播速度, 从而引起脉冲时域展宽^[31].

因此本研究引入脉冲展宽系数来评价不同参数的微带线在传输太赫兹脉冲时的色散, 并将其定义为输出脉冲的宽度与输入脉冲宽度的比值. 当脉冲展宽系数越接近于 1, 表明微带线的色散越小; 当脉冲展宽系数越大, 表明微带线的色散效应越强.

3 微带线的太赫兹色散特性影响因素分析

3.1 时域有限差分法分析 (CST)

时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 是一种基于麦克斯韦方程组的数值计算方

法. 在数值仿真软件中应用 FDTD 方法时, 首先将微带线所在的空间进行离散化处理, 将时间也进行离散. 通过迭代计算麦克斯韦方程组在离散网格上的电场和磁场分量, 模拟电磁波在微带线中的传播过程. 为验证理论分析的准确性, 本研究利用数值仿真模拟分析不同参数的微带线在传输低频太赫兹信号时的色散情况, 主要对色散的主要影响因素进行分析, 包括导线宽度、介质基底材料等, 并验证金属导线材料对微带线的色散影响可以忽略不计.

在太赫兹频段, 这种方法可以精确地计算出微带线中电磁场的瞬态分布, 进而得到传播常数、衰减常数等色散特性参数. 通过改变微带线的结构参数(如基底材料、导线宽度等), 可以分析这些因素对色散特性的影响. 图 2(a)—(c) 分别为 3 种不同介电常数的基底材料, 微带线长度均为 20 mm, 导线宽度变化为 100—1600 μm 时的脉冲反射信号. 如图 2(a) 数值仿真模拟结果所示, 导线宽度对脉冲信号的传输特性具有显著影响, 当导线宽度逐渐增大时, 反射信号的延迟时间逐渐增加, 即传输速度因导线宽度的增大逐渐降低. 另外反射信号的幅值呈现出逐渐减小的趋势, 并且反射脉冲发生了明显的展宽. 由于色散的本质是信号的不同频率成分在介质中的传播速度存在差异, 介电常数会影响脉冲传播速度与频率的关系. 当介电常数越高时, 介质的极化能力越强, 对太赫兹信号中不同频率成分的作用差异越大, 会加剧色散效应, 因此会导致传输速度变慢, 进而信号反射的时间更长. 如图 2(a)—(c) 所示, 3 种不同介质基底的微带线的脉冲信号反射时间分别在 190 ps, 210 ps, 240 ps 附近, 这一现象与理论分析结果一致.

长度为 150 mm, 不同宽度导线的仿真信号如图 3 所示. 由于脉冲的传输距离长, 与较短导线相比, 微带线的色散更加严重, 所传输的脉冲信号逐渐产生其他频率的分量, 进而导致不便于直接分析色散对脉冲宽度的影响, 如图 3(a), (b) 所示, 其中图 3(b) 为图 3(a) 的局部放大图. 在不影响整体分析结果的前提下, 本研究采取包络分析对产生色散的脉冲信号进行处理, 如图 3(c) 所示, 当导线宽度逐渐增大时信号的传输速度可能会相应降低, 即累计的色散损耗更大.

对比图 3 与图 2 相比, 导线长度从 20 mm 增至 150 mm 时, 长度增大引入的色散使得信号的波

形发生较大的畸变. 因此有必要分析长度变化对色散的影响. 图 4 所示为对不同长度微带线在太赫兹低频段脉冲时域仿真的结果, 其原始时域反射信号反映了脉冲信号随着传输距离的增大产生了显著的主峰右移, 即时间和幅值衰减. 由于该信号为高斯脉冲, 不便于直接观察其传输过程中的脉冲展宽

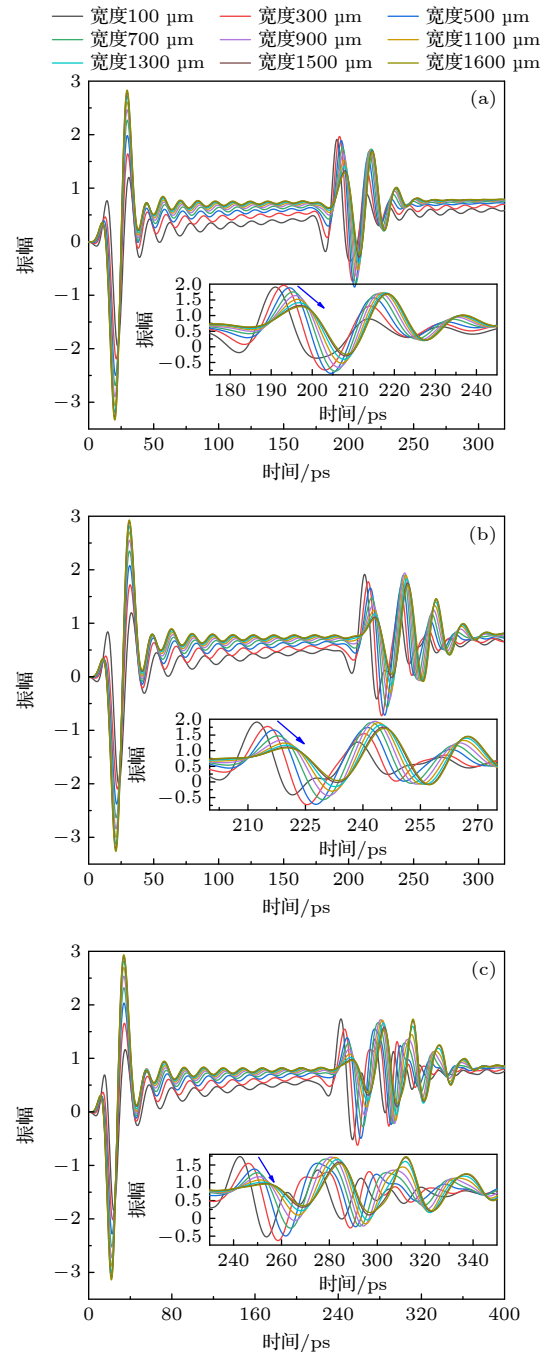


图 2 不同介质基底的微带线的 TDR 仿真信号 (a) 介电常数为 2.2; (b) 介电常数为 3; (c) 介电常数为 4.4

Fig. 2. TDR simulation signals of microstrip lines with different dielectric substrates: (a) The dielectric constant is 2.2; (b) the dielectric constant is 3; (c) the dielectric constant is 4.4.

情况. 本研究采取了包络分析剥离振荡细节, 精确量化色散导致的脉冲展宽程度与信号延迟时间. 经过包络分析之后明显观察到脉冲宽度随着传输距离显著增大, 且信号幅值下降明显, 这是群速度色散的典型表现.

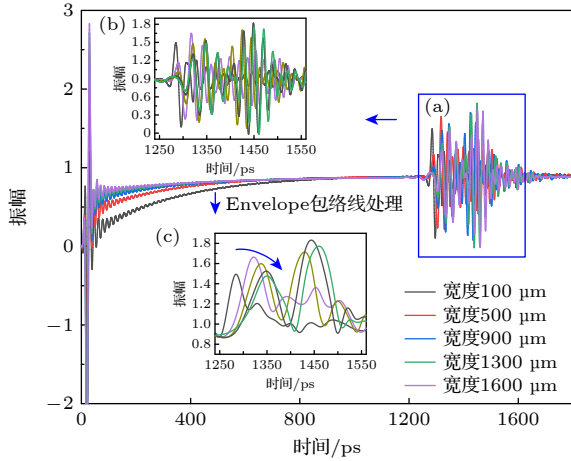


图 3 长度为 150 mm, 不同宽度微带线 TDR 仿真信号 (a), (b) 局部放大图; (c) envelope 包络处理
Fig. 3. TDR simulation signals of microstrip lines with different widths and lengths of 150 mm: (a), (b) Partial enlarged image; (c) envelope processing.

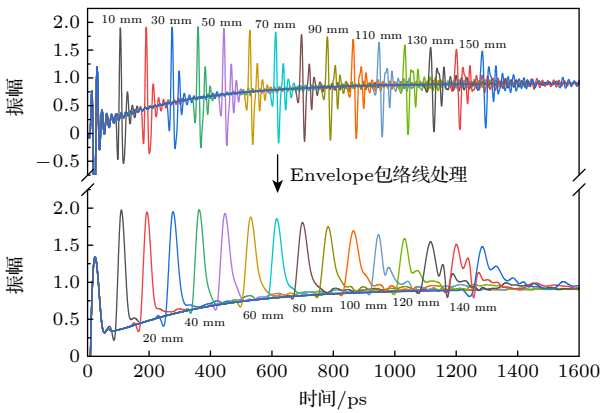


图 4 不同长度的微带线的 TDR 仿真信号
Fig. 4. TDR simulation signals of microstrip lines of different lengths.

在上述的理论分析中, 由于太赫兹波在金属中的趋肤深度在纳米量级, 因此当微带线在传输太赫兹脉冲时, 导体损耗可以忽略不计, 即金属材料对色散的影响可以忽略不计^[32]. 本研究选用金(电导率 4.1×10^7 S/m)、银(电导率 6.3×10^7 S/m)、铜(电导率 5.8×10^7 S/m) 3 种不同金属作为微带线上的导体进行模拟仿真, 结果如图 5 所示. 可以看出, 3 条曲线几乎完全重合, 表明尽管不同的金属材料

的电导率存在差异, 但在微波高频波段以及太赫兹波段, 由于趋肤深度远小于导线的厚度, 金属电导率的差异被显著弱化, 导体材料相对于介质材料、几何参数对色散的影响微乎其微.

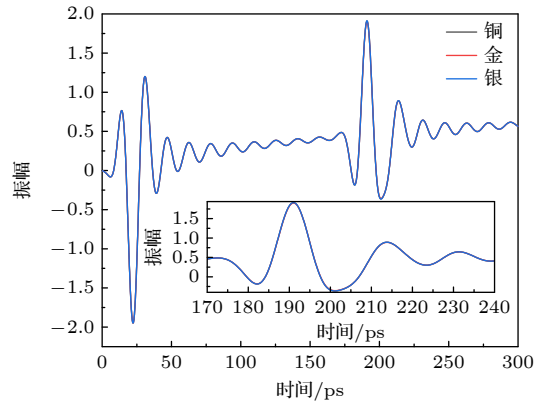


图 5 不同金属导线的 TDR 仿真信号
Fig. 5. TDR simulation signals of different metal wires.

3.2 不同参数的色散特性实验验证

根据修正的微带线色散模型, 影响微带线色散的主要因素包括介质材料、几何参数、导体属性, 其中在高频部分, 特别是在太赫兹波段金属导体的趋肤深度处于微米量级, 因此导体损耗可以忽略不计. 本研究利用 ADVANTEST 的太赫兹脉冲时域反射诊断装置对微带线在太赫兹低频段的色散特性进行实验验证.

3.2.1 不同基底的介电常数

基底的介电常数直接影响微带线的有效介电常数, 进而影响电磁波的传播速度和相位. 根据理论分析可知, 高介电常数的基底会使电磁波在微带线中的传播速度减慢, 导致相位常数增大, 从而影响色散特性. 通过太赫兹脉冲时域反射计对 3 种不同介质基底的微带线传输 110 GHz 的低频太赫兹脉冲展宽情况进行分析, 并根据脉冲的微带线导体的长度、反射时间计算脉冲的传播速度, 进而反向计算不同材料的微带线的等效介电常数. 选择介电常数为 2.2, 3, 4.5 三种不同介质基底, 厚度均为 1600 μm , 导线宽度均为 100 μm 的微带线样品. 为保证实验结果的准确性, 分别测试了 10 mm 与 100 mm 两种不同长度的微带线, 结果如图 6(a), (b) 所示. 从图 6 能够明显观察到, 当介质基底的介电常数越大时, 脉冲的传播速度越慢, 这一现象与理论分析、模拟仿真结果均一致.

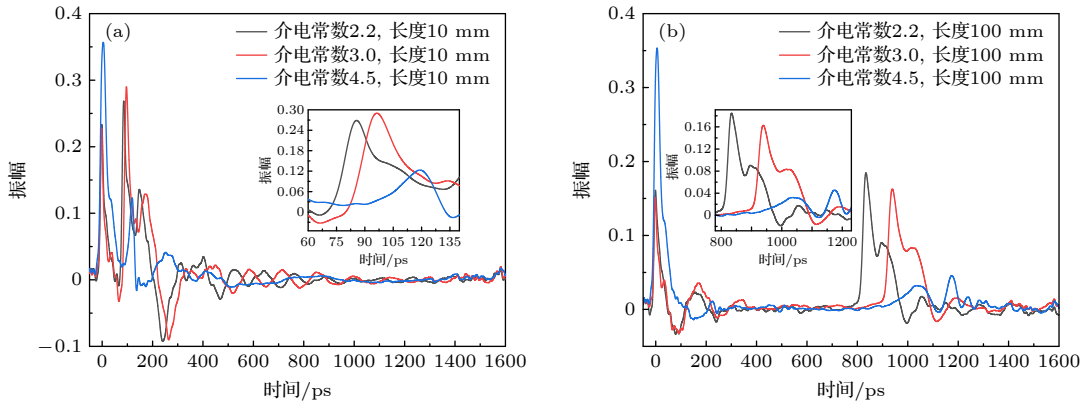


图 6 不同基底的微带线实测反射信号 (a) 长度 10 mm; (b) 长度 100 mm

Fig. 6. Reflected signals measured from microstrip lines on different substrates: (a) 10 mm length; (b) 100 mm length.

3.2.2 不同导线宽度

导线宽度影响微带线的特性阻抗和电磁场分布. 较窄的导线会增强边缘效应, 使得电磁场分布发生变化, 进而影响色散特性. 通过改变导线宽度并测试相应的色散参数, 如相速度、群速度等, 根据理论分析, 微带线上导体的宽度虽然对等效介电常数有一定影响, 但是相对于其他参数, 其影响程度不够明显. 因此为便于观察不同宽度的微带线对色散的影响, 本研究在实验测试时, 向较长的导线发射太赫兹脉冲, 其更大的色散损耗将使反射脉冲的展宽更加明显, 结果如图 7 所示. 其中, 微带线长度为 150 mm, 介质基底的介电常数为 2.2, 导线宽度依次为 100 μm , 500 μm , 900 μm , 1300 μm , 1600 μm . 从图 7 能够明显观察到, 当导线越宽时, 反射脉冲的相位延迟越明显, 即脉冲的传播速度越慢, 等效介电常数越大. 另外还可以看出当导线宽度增大时, 相位延迟现象较振幅衰减现象更明显.

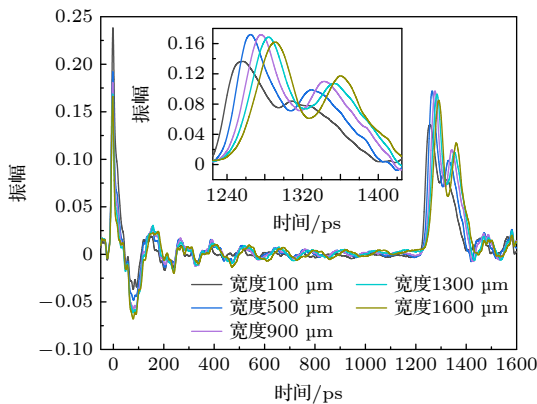


图 7 不同宽度的微带线实测反射信号

Fig. 7. Reflected signals measured from microstrip lines of different widths.

根据理论分析, 传播常数的实部决定相位延迟, 虚部决定所传输信号幅度的衰减, 而实部受限于介质色散与几何色散, 虚部受限于导体损耗与介质损耗, 表明在本研究中介质色散与几何色散占主导地位, 这一现象与理论分析一致.

3.2.3 不同长度的导线

导线长度会影响电磁波在其中的传播时间和累积相位变化. 随着导线长度增大, 色散效应会逐渐累积, 导致信号畸变加剧. 分别对基底介电常数为 2.2 的不同长度微带线进行实验测试, 结果如图 8 所示. 随着微带线长度从 30 mm 增至 150 mm, 信号脉冲的宽度逐渐变宽. 这是信号畸变的一个重要表现, 意味着信号在传输过程中不同频率成分的传播速度出现差异, 导致脉冲在时间上扩散开来, 这是色散现象的典型特征. 另外, 信号的幅值也发生了改变. 随着微带线长度增大, 信号的峰值幅值

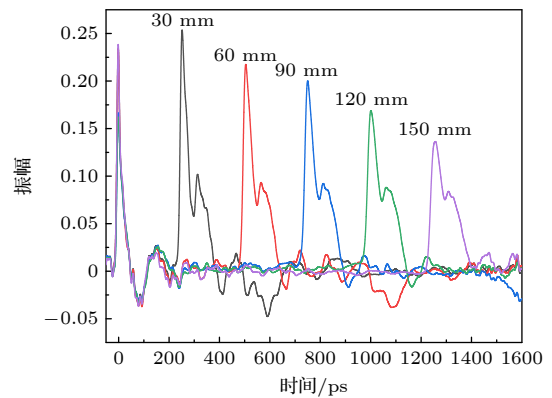


图 8 不同长度的微带线实测反射信号

Fig. 8. Reflected signals measured from microstrip lines of different lengths.

总体上有减小的趋势,说明信号在传输过程中存在能量损耗,并且这种损耗随着传输距离(微带线长度)的增大而增大.原始信号是较为规则的脉冲形状,但随着微带线长度增大,上升沿和下降沿变得更加平缓,不再像短距离传输时那样陡峭.这也是信号畸变的表现,说明信号的高频成分在传输过程中存在较大的色散损耗,使得信号的形状发生了改变.

3.3 不同参数的微带线色散效应分析

在对微带线传输低频太赫兹脉冲信号时,微带线参数的变化必然会引起等效介电常数的改变,最终使测试脉冲的宽度增大,因此采用脉冲展宽系数来对不同参数微带线的色散进行定量描述.图9显示了微带线导体长度不变宽度逐渐增加、导体宽度不变长度逐渐增加时的脉冲展宽系数的变化曲线.当微带线导体的宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,脉冲展宽系数仅为 3.18;随着微带导体宽度增大,脉冲展宽系数也逐渐增大,当微带线导体宽度为 $1600\ \mu\text{m}$ 时,脉冲展宽系数增至 5.12,增幅为 38%.红色曲线为根据实测数据拟合的结果,表明微带线的色散效应随着导线宽度逐渐增大.当微带线的长度从 10 mm 逐渐增至 150 mm 时,虽然脉冲展宽系数的实测和拟合结果也呈现出逐渐增大的趋势,但是其增幅明显低于宽度变化时的增幅.当微带线导体长度为 10 mm 时,脉冲展宽系数为 2.12;微带线导体长度为 150 mm 时,脉冲展宽系数为 3.18,增幅仅为 33%.结果表明,虽然导线长度增大会使微带线的色散损耗增大,但是导线宽度的变化对微带线的色散影响程度更大.

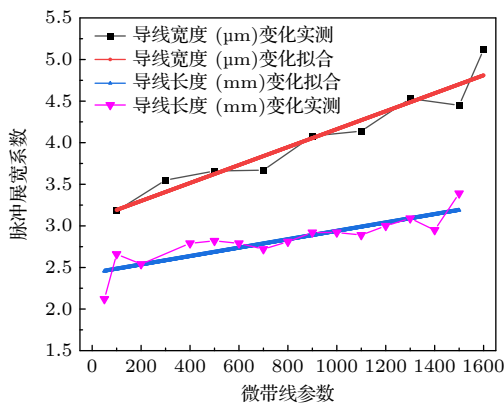


图9 不同参数的微带线脉冲展宽系数分析

Fig. 9. Analysis of pulse widening coefficient of microstrip lines with different parameters.

4 结论

本研究围绕微带线在太赫兹频段的色散特性展开多维度研究,通过理论建模、数值仿真与实验验证相结合的方法,系统分析了色散机理及关键影响因素.在理论分析层面,传统准静态分析法在高频段精度受限,而修正后的色散模型(涵盖介质色散、导体色散和几何色散)能更准确描述太赫兹频段的非准静态效应,其中介质色散和几何色散是主要影响因素,导体色散可忽略.数值仿真表明,基底介电常数越高、导线宽度越宽,脉冲传输速度越慢,色散效应越显著,且金属材料对色散的影响可忽略不计.实验验证结果与理论分析高度吻合:介电常数越大、导体宽度越宽微带线的色散效应越明显,导线宽度从 $100\ \mu\text{m}$ 增至 $1600\ \mu\text{m}$ 时,脉冲展宽系数从 3.18 增至 5.12,而长度从 10 mm 增至 150 mm 时,展宽系数仅增大 1.06 倍,表明宽度对微带线色散影响程度更大.本研究为太赫兹微带线的结构设计和系统集成提供了量化依据,有助于推动太赫兹通信、雷达探测等领域的实用化进程,对拓展太赫兹技术在生物医学成像、安全检查等场景的应用具有重要意义.

参考文献

- [1] Okubo K, Manago G, Tanabe T, Yu J, Liu X Y, Sasaki T 2025 *Waste Manag.* **196** 32
- [2] Guo H, Hilaili M, Sari B P P, Putri W D R, Ogawa Y 2025 *Food Chem.* **479** 143867
- [3] Zhang H T, Wang L J, Tan L, Zhao X T, Tian C H 2024 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **44** 2120 (in Chinese) [张红涛, 王龙杰, 谭联, 赵鑫涛, 田承浩 2024 *光谱学与光谱分析* **44** 2120]
- [4] Iftekhharul F A M, Naim M N R, Noor K S, Kundu D, Rashed A N Z 2025 *Cell Biochem Biophys* **83** 489
- [5] Wekalao J 2025 *Plasmonics* DOI: 10.1007/s11468-025-02858-z
- [6] Wang Y Y, Li H B, Ge M L, Xu D G, Yao J Q 2023 *Laser Optoelectron. Prog.* **60** 18 (in Chinese) [王与焯, 李海滨, 葛梅兰, 徐德刚, 姚建铨 2023 *激光与光电子学进展* **60** 18]
- [7] Peng D L, Xu L M, Wu H, Wang T, Xiao H, Cheng L L, Qin Y W 2025 *Opt. Express* **33** 16237
- [8] Zeng Z K, Luo S J, Chen M Y, Zhao G P, He C H, Wu H 2024 *IEEE Sens. J* **24** 21
- [9] Wei C S, Li Q F, Ma X Y, Yang Y P 2024 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **44** 3001 (in Chinese) [魏春生, 李奇峰, 马翔云, 杨云鹏 2024 *光谱学与光谱分析* **44** 3001]
- [10] Xue Q, Ji C W, Ma S D, Guo J J, Xu Y J, Chen Q B 2024 *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **26** 1520
- [11] Wang L, Dai J Y, Ding K S, Zeng H X, Cheng Q, Yang Z Q, Zhang Y X, Zhang Y X, Cui T J 2024 *Sci. Adv.* **10** eadq8693
- [12] Feng Q, Zhao F 2025 *Acta Opt. Sin.* **45** 0806002 (in Chinese)

- [冯琦, 赵峰 2025 光学学报 45 0806002]
- [13] Lees H, Headland D, Murakami S, Fujita M, Withayachumnankul W 2024 *APL Photonics* **9** 036107
- [14] Bonmann M, Moradikouchi A, Bryllert T, Sparén A, Folestad S, Johansson J 2024 *IEEE Sens. J.* **24** 20512
- [15] Hossain M S, Mohammad S H M, Rahman H, Sen S 2024 *Res. Opt.* **14** 100599
- [16] Zhang J Y, Yang X K, Ren J J, Li L J, Zhang D D, Gu J, Xiong W H 2024 *Measurement* **233** 114771
- [17] Wang L M, Zhu L J, Sun Y H 2025 *J. At. Mol. Phys.* **42** 041006 (in Chinese) [王利民, 朱立江, 孙延华 2025 原子与分子物理学报 42 041006]
- [18] Huang Y, Kida T, Wakiuchi S, Okatani T, Inomata N, Kanamori Y 2024 *Adv. Sci.* **11** 34
- [19] Li Z F 2017 *Microstrip Circuit* (Beijing: Tsinghua University Press) pp99–109 (in Chinese) [李征帆 2017 微带电路 (北京: 清华大学出版社) 第 99—109 页]
- [20] Taiki K, Taiki Y, Ren K, Youngwoo K, Jerdvisanop C, Yuichi H 2022 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **64** 5
- [21] Aditya R, Eric B, Melinda P M, Mohammed F H 2024 *IEEE Trans. Signal Power Integr.* **3** 178
- [22] Singh P, Awasthi Y K 2024 *IJRASET* **13** 642
- [23] Singh P, Awasthi Y K 2024 *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Techn.* **12** 1447
- [24] Yin J J 2004 *Microwave Technology and Antenna* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p117 (in Chinese) [殷际杰 2004 微波技术与天线 (北京: 电子工业出版社) 第 117 页]
- [25] Luan X Z, Wang Z B, Fu S Q, Fang S J 2017 *Microwave Technology and Microwave Devices* (Beijing: Tsinghua University Press) p74 (in Chinese) [栾秀珍, 王钟葆, 傅世强, 房少军 2017 微波技术与器件 (北京: 清华大学出版社) 第 74 页]
- [26] Merlyn S, Rastogi A K 2024 *Int. J. Sci. Mod. Res. Technol.* **16** 7
- [27] Zhu J 2019 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing Forestry University) (in Chinese) [朱晶 2019 硕士学位论文 (南京: 南京林业大学)]
- [28] Biswas K 2020 *International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET 2020) Tamil Nadu, India, December 4–5, 2020* p1070
- [29] Biswas, K, Lakshman D, Bidyut H 2024 *IJCSRR* **07** 4186
- [30] Nobuki H, Tadashi N, Naoki H, Momoka T, Hiroki O, Jihoon K 2025 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **73** 5897
- [31] Gunda K 2019 *M. S. Thesis* (Hamburg: Universität Hamburg)
- [32] Xu Z, Luo M, Li J N, Liu L H, Xu D G 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 114203 (in Chinese) [徐振, 罗曼, 李吉宁, 刘龙海 徐德刚 2024 物理学报 73 114203]

Analysis and experimental verification of dispersion characteristics of microstrip lines in terahertz low frequency band*

XU Zhen^{1)2)#} LUO Man^{1)2)#} LIANG Bohan¹⁾²⁾ LI Jining^{1)2)†} ZHANG Jiaxin³⁾
WANG Tan³⁾ CHEN Kai¹⁾²⁾ XU Degang¹⁾²⁾

1) (School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

3) (Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R & T Center, Beijing 100854, China)

(Received 27 May 2025; revised manuscript received 4 August 2025)

Abstract

Terahertz waves have broad application prospects in fields such as food quality, biomedicine, and security communication. However, the dispersion and loss during transmission limit the development of terahertz systems. This study focuses on the dispersion characteristics of microstrip lines in the terahertz low-frequency range. By combining theoretical modeling, numerical simulation, and experimental verification, the dispersion mechanism and key influencing factors of microstrip lines are systematically analyzed, providing theoretical support for low dispersion, high-performance terahertz integrated circuits and systems. This study is based on electromagnetic field theory, dividing microstrip line dispersion into dielectric dispersion, geometric dispersion,

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20123, 62175182, 62275193, U22A20353, 62405214).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: jiningli@tju.edu.cn

and conductor dispersion, and introducing a modified model to overcome the limitations of traditional quasi-static theory in the high frequency range. In this study, the CST time-domain finite difference simulation and terahertz time-domain pulse reflection (TDR) technology are employed to conduct multidimensional simulation and examine three different dielectric constant substrates (2.2, 3, 4.5), wire widths (100–1600 μm), lengths (10–150 mm) and other parameters. The pulse broadening coefficient is introduced to quantitatively evaluate the dispersion characteristics of microstrip lines. The results indicate that the increase in substrate dielectric constant significantly enhances the dispersion effect. When ϵ_r increases from 2.2 to 4.5, the increase in equivalent dielectric constant leads to a decrease in pulse transmission speed. When the wire width increases from 100 μm to 1600 μm , the pulse broadening coefficient dominated by geometric dispersion increases from 3.12 to 5.12, with an increase of 38%. However, when the wire length increases from 10 mm to 150 mm, the cumulative dispersion increases the broadening coefficient from 2.12 to 3.18, with an increase of 33%, verifying the sensitivity of width to dispersion control. The simulation result once again shows that due to the small skin depth of terahertz waves on metal surfaces, the difference in conductivity among the three conductor materials of gold, silver, and copper (4.1×10^7 – 6.3×10^7 S/m) can be ignored in terms of dispersion effect. According to the actual measurement and fitting results, the geometric dispersion of microstrip lines is more significant than the dispersion loss caused by length accumulation. In addition, simulation, experimental testing, and theoretical analysis are all in good consistency with each other. The conclusion indicates that optimizing the design of microstrip lines requires priority control of the dielectric constant and wire width of substrate material to suppress the synergistic effect of geometric dispersion and dielectric dispersion, providing quantifiable design criteria for high bandwidth and low distortion transmission in terahertz communication systems, and laying experimental and theoretical foundations for the engineering application of terahertz integrated circuits.

Keywords: microstrip line, terahertz, dispersion characteristics, pulse broadening coefficient

PACS: 42.82.Et, 42.68.Ay, 87.50.U–, 84.40.Az

DOI: [10.7498/aps.74.20250690](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250690)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250690](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250690)

微带线在太赫兹低频段的色散特性分析与实验验证

徐振 罗曼 梁博涵 李吉宁 张嘉昕 王坦 陈锴 徐德刚

Analysis and experimental verification of dispersion characteristics of microstrip lines in terahertz low frequency band

XU Zhen LUO Man LIANG Bohan LI Jining ZHANG Jiabin WANG Tan CHEN Kai XU Degang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 214204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250690

CSTR: 32037.14.aps.74.20250690

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250690>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹金属线波导传输特性实验研究及模拟分析

Experimental study and simulation analysis of transmission characteristics of terahertz metal wire waveguides

物理学报. 2024, 73(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240279>

太赫兹GaAs光电导天线阵列辐射特性

Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays

物理学报. 2021, 70(24): 248704 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211210>

双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性

Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2021, 70(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用

Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications

物理学报. 2021, 70(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210084>

低磁场螺旋波等离子体中Trivelpiece-Gould波的功率沉积特性

Analysis of power deposition characteristics of Trivelpiece-Gould wave in low magnetic field helicon plasma

物理学报. 2025, 74(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250303>