

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2025 年 2 月 20 日 (20.02.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/035986 A1

(51) 国际专利分类号:
H04B 11/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2024/103061

(22) 国际申请日: 2024 年 7 月 2 日 (02.07.2024)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202311039385.8 2023年8月17日 (17.08.2023) CN

(71) 申请人: 香港大学 (THE UNIVERSITY OF HONG KONG) [CN/CN]; 中国香港特别行政区薄扶林道, Hong Kong (CN)。国家纳米科学中心 (NATIONAL CENTER FOR NANOSCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区中关村北一条11号, Beijing 100190 (CN)。

(72) 发明人: 张霜 (ZHANG, Shuang); 中国香港特别行政区薄扶林道香港大学庄月明物理楼518, Hong Kong (CN)。管福鑫 (GUAN, Fuxin); 中国香港特别行政区薄扶林道香港大学庄月明物理楼207, Hong Kong (CN)。戴庆 (DAI, Qing); 中国北京市

海淀区中关村北一条11号, Beijing 100190 (CN)。郭相东 (GUO, Xiangdong); 中国北京市海淀区中关村北一条11号, Beijing 100190 (CN)。

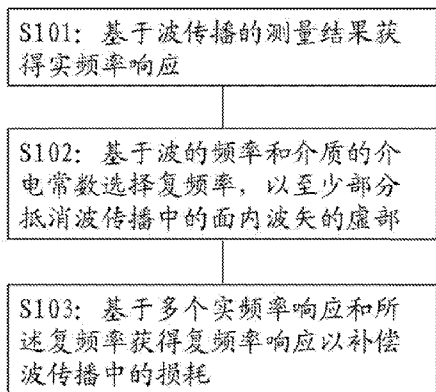
(74) 代理人: 北京泛华伟业知识产权代理有限公司 (PANAWELL & PARTNERS, LLC); 中国北京市朝阳区朝阳门外大街16号中国人寿大厦1002-1005, Beijing 100020 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚

(54) Title: METHOD FOR COMPENSATING FOR LOSS IN WAVE PROPAGATION

(54) 发明名称: 补偿波传播中的损耗的方法



S101 Obtain real frequency responses on the basis of a measurement result of wave propagation
S102 Select a complex frequency on the basis of the frequency of a wave and the dielectric constant of a medium so as to at least partially counteract the imaginary part of an in-plane wave vector in the wave propagation
S103 On the basis of a plurality of real frequency responses and the complex frequency, obtain a complex frequency response to compensate for loss in the wave propagation

图 1

(57) Abstract: Provided is a method for compensating for loss in wave propagation, comprising: obtaining real frequency responses on the basis of a measurement result of wave propagation; selecting a complex frequency on the basis of the frequency of a wave and the dielectric constant of a medium so as to at least partially counteract the imaginary part of an in-plane wave vector in the wave propagation; and on the basis of a plurality of real frequency responses and the complex frequency, obtaining a complex frequency response to compensate for loss in the wave propagation.

(57) 摘要: 提供一种补偿波传播中的损耗的方法, 包括: 基于波传播的测量结果获得实频率响应; 基于波的频率和介质的介电常数选择复频率, 以至少部分抵消波传播中的面内波矢的虚部; 基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗。

(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

补偿波传播中的损耗的方法

技术领域

5 本发明涉及波传播领域，尤其涉及一种通过合成复频波补偿波传播中的损耗的方法。

背景技术

极化激元是由于介质表面上的粒子与入射光场相互作用，形成的一种
10 表面电磁波。其中包含基于电子-光子杂化的表面等离激元和基于声子-光子杂化的声子极化激元。这种极化激元电磁波的能量密度高于入射光场，因此可以在介质表面上产生强烈的电场增强效应。极化激元能够将光场压缩聚焦至很小尺度，因而可以实现在纳米尺度上的光信息传输和处理。受益于亚波长光限制，表面等离极化激元和声子极化激元提供了一种超越传统光学衍射极限的方法，并有助于高效能量存储、局部场增强以及高灵敏度。但是损耗限制了极化激元的传播长度，从而限制了极化激元的实际使用。虽然优化制造技术有助于避免不完美结构造成的散射损耗，但导致热量产生的本征损耗无法消除。因此，如何克服本征损耗以实现波的无损传播是本领域亟需解决的问题。

20

发明内容

基于现有技术的上述问题，本发明提出一种通过合成复频波补偿波传播中的损耗的方法，包括：

基于波传播的测量结果获得实频率响应；

25 基于波的频率和介质的介电常数选择复频率，以至少部分抵消波传播中的面内波矢的虚部；

基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗。

30 在一个实施例中，基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗的步骤包括通过以下公式计算复频率响应：

$$F(\tilde{\omega}, r, t) \approx \sum_i F(\omega'_i, r) e^{-i\omega'_i t} \Delta\omega / (2\pi i (\tilde{\omega} - \omega'_i))$$

其中, $F(\omega'_i, r)$ 为实频率响应, $F(\tilde{\omega}, r, t)$ 为复频率响应, ω'_i 为实频率, i 为正整数, $\tilde{\omega}$ 为复频率, t 为时间, $\Delta\omega$ 为实频率 ω'_i 的间隔频率, r 为波的位置。

5 在一个实施例中, 所述波为极化激元, 波传播的测量结果为波的电场强度。

在一个实施例中, 所述复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$, ω 为中心频率, β 为虚拟增益, 其被选择为使得面内波矢的虚部为零。

10 在一个实施例中, 波在其中传播的介质的介电常数由德鲁德模型描述为 $\varepsilon_m = \varepsilon_r - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$, ε_m 为介质的介电常数, ε_r 为频率 ω 趋向于无穷时的介电常数, ω_p 为介质层的等离激元频率, γ 为介质层的阻尼率。

在一个实施例中, $\beta \approx \gamma\omega_p^2\omega^2 / (2(\omega_p^2 - \varepsilon_r\omega^2)^2 + 2\varepsilon_r\omega^4)$ 。

15 在一个实施例中, 波在其中传播的介质的介电常数由洛伦兹模型描述为 $\varepsilon_m = \varepsilon_r - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma - \omega_0^2)$, ε_m 为介质的介电常数, ε_r 为频率 ω 趋向于无穷时的介电常数, ω_p 为介质层的等离激元频率, γ 为介质层的阻尼率, ω_0 为模型的共振频率。

在一个实施例中,

$$\beta \approx 0.5\gamma\omega_p^2\omega^2 / (\varepsilon_r(\varepsilon_r + 1)(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega_0^2 + 2\varepsilon_r(\omega_0^2 - \omega^2))\omega_p^2 + \omega_p^4)$$

20 本发明还提供一种计算机可读存储介质, 其上包含有计算机程序, 所述计算机程序能够被处理器执行以实现上述方法的步骤。

20 本发明还提供一种电子设备, 其包括:

一个或多个处理器; 以及

存储器, 用于存储一个或多个可执行指令;

25 所述一个或多个处理器被配置为经由执行所述一个或多个可执行指令以实现上述方法的步骤。

本发明的通过合成复频波补偿波传播中的损耗的方法, 通过具有虚拟增益的复频率以及多个实频率响应合成复频波, 能够补偿波传播中的损耗, 实现波的无损传播。

附图说明

图 1 示出了根据本发明一个实施例的通过合成复频波补偿波传播中的损耗的方法的流程图。

图 2A 示出了等离极化激元 (SPP) 的激发场分布。

图 2B 示出了 SPP 相应的傅里叶分布。

图 2C 示出了复频率激励下的色散。

图 2D 示出了 $\tilde{f} = (700 - 42.3i)$ THz 处的复频率激励在不同时刻的动态演化。

5 图 2E 示出了在 $t = 5.5 \times 10^{-2}$ ps 处相应的空间场分布。

图 3A 示出了基于散射式扫描近场光学显微镜技术的实验装置。

图 3B 示出了两个实频率的场分布。

图 3C 示出了两个复频率的场分布。

10 图 4 示出了原子力显微镜图像,其示出了在不同频率下测量的 MoO_3 界面上的近场分布。

图 5A 示出了复频率 $(910 - 6.5i) \text{ cm}^{-1}$ 在不同时间的合成电场分布,时间步长为 0.53 ps。

图 5B 示出了不同合成频率数的成像图案,其中,中心频率固定为 910 cm^{-1} , 频率间隔固定为 1 cm^{-1} 。

15 图 6A 示出了实验样品的原子力显微镜图像。

图 6B 示出了频率为 $f = 990 \text{ cm}^{-1}$ 时电场分布的幅度和实部。

图 6C 示出了频率为 $f = (990 - 2i) \text{ cm}^{-1}$ 时天线之间的干涉图案。

具体实施方式

20 为了使本发明的目的、技术方案以及优点更加清楚明白,下面将结合附图通过具体实施例对本发明作进一步详细说明。应当注意,本发明给出的实施例仅用于说明,而不限本发明的保护范围。

极化激元,包括表面等离极化激元(SPP)和声子极化激元(PhP),已成为构建纳米光子电路的首选,从而促进超紧凑和高速光学器件的开发。
25 在纳米光子学中利用极化激元提供了克服光衍射极限的途径,从而可以在纳米尺度上操纵光。然而,本征损耗阻碍了许多对损耗敏感的基于极化激元的应用,包括波导、生物传感、亚衍射极限成像和等离子体结构照明显微镜。本征损耗主要通过两个方面对极化激元产生负面影响:(1)传播距离显著缩短;(2)远离光锥的极化激元的色散曲线显著模糊,严重影响极
30 化激元的亚波长应用。

本征损耗是由材料中电介质的虚部引起的,例如等离激元系统中的欧姆损耗以及声子-等离激元系统中的晶格振动弛豫过程。抵消损耗最常用的

- 5 方法是加入外部增益介质。然而，用增益完全抵消等离子体损耗是非常具有挑战性的，并且增益补偿容易受到噪声和不稳定的影响。经过研究，本发明提出了一种通过合成复频波实现波的无损传播的方法，能够实现高度受限的极化激元的几乎无损传播。

支持等离/声子极化激元的典型材料可以通过德鲁德模型 (Drude model)、洛伦兹模型 (Lorentz model) 或多洛伦兹模型 (multi-Lorentz model) 10 进行描述，其中包含导致面内波矢虚部的损耗项。

为简单起见，以界面处的 SPP 为例进行说明，面内波矢 k 的数学解为 $k = \omega\sqrt{\epsilon_m}/(c\sqrt{1+\epsilon_m})$ ，其中， ω 为波频率， c 为光速， ϵ_m 为介质的介电常数。 20 在一个实施例中，假设等离子体金属的介电常数 ϵ_m 由德鲁德模型描述，即 $\epsilon_m = \epsilon_r - \omega_p^2/(\omega^2 + i\omega\gamma)$ ，其中， ϵ_r 为频率 ω 趋向于无穷时的介电常数， ω_p 为介质层的等离激元频率， γ 为介质层的阻尼率。其中，分母中的耗散项引入了 SPP 传播的衰减。通常认为通过用特定的复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\gamma/2$ 补偿德鲁德模型中的损耗，就可以实现 SPP 的无损传播。然而，这并不完全准确， 25 将复频率 $\tilde{\omega}$ 代入面内波矢 k 的公式中后，面内波矢 k 中仍然存在一个与频率相关的项 $\tilde{\omega}$ ，其会导致波矢 k 中出现虚部。因此，波无损传播的条件应为面内波矢 k 的虚部为 0，即 $Im(k(\tilde{\omega}))=0$ ，亦即 $Im(k(\tilde{\omega})^2)=0$ ，得到：

$$Im(\tilde{\omega}^2 \epsilon_m(\tilde{\omega})/(1+\epsilon_m(\tilde{\omega})))=0 \quad (1)$$

其中， $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$ ， ω 对应于中心频率， β 表示虚拟增益， $\omega \gg \beta$ ， $\omega_p \gg \gamma$ 。通过忽略二阶小量，得到：

$$\tilde{\omega}^2 \approx \omega^2 - 2i\beta\omega \quad (2)$$

将等式 (2) 代入等式 (1) 得到：

$$Im((\omega^2 - 2i\beta\omega) \frac{(\omega^2 - 2i\beta\omega + i\omega\gamma)\epsilon_r - \omega_p^2}{(\omega^2 - 2i\beta\omega + i\omega\gamma)(\epsilon_r + 1) - \omega_p^2}) = 0 \quad (3)$$

25 由此得到：

$$\beta \approx \gamma\omega_p^2\omega^2/(2(\omega_p^2 - \epsilon_r\omega^2)^2 + 2\epsilon_r\omega^4) \quad (4)$$

所得到的复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$ 能够确保面内波矢 k 的虚部为零，这意味着 30 SPP 沿界面没有空间增长或衰减。因此，为了实现无损传播，需要找到合适的复频率虚部值。

在另一实施例中，假设等离子体金属的介电常数 ϵ_m 由洛伦兹模型描述，即 $\epsilon_m = \epsilon_r - \omega_p^2/(\omega^2 + i\omega\gamma - \omega_0^2)$ ， ω_0 为模型的共振频率。可以得到复频率 $\tilde{\omega}$ 的虚

部 β 为:

$$\beta \approx 0.5\gamma\omega_p^2\omega^2/(\varepsilon_r(\varepsilon_r + 1)(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega_0^2 + 2\varepsilon_r(\omega_0^2 - \omega^2))\omega_p^2 + \omega_p^4) \quad (5)$$

通过上述公式可以看出,通过选择复频率 $\tilde{\omega}$ 的虚部 β 的值,使得面内波矢的虚部为 0,可以抵消本征损耗,实现波的无损传播。在另一实施例中也可以选择复频率 $\tilde{\omega}$ 的虚部 β 的值以使得面内波矢的虚部趋近于 0,以至少
10 部分补偿损耗,使得波可以传播得更远。

本领域技术人员应当理解,上述公式(4)和公式(5)仅仅是示例性的,并不构成对本发明的限制。也可以使用其他的模型描述介电常数 ε_m ,从而得到不同的复频率的虚部的值。因此,在实际应用中,可以使得面内
15 波矢的虚部为 0 或趋近于 0,计算得到的复频率能够至少部分抵消面内波矢的虚部,从而至少部分抵消本征损耗,减少波的传播损耗。

在确定了选择复频率 $\tilde{\omega}$ 的虚部 β 的值之后,下面将说明如何利用该值生
15 成复频波,以实现波的无损传播或者使其传播得更远。

具有时间衰减的复频波 $E(t) = e^{-i\tilde{\omega}t}$ 在时间接近负无穷时是发散的。由
20 于直接生成复频波非常困难,因此本发明人使用一种新的方法来合成截断的复频波,表示为 $E_T(t) = e^{-i\tilde{\omega}t}\theta(t)$,其中 $E_T(t)$ 为截断的复频波的强度; $\theta(t)$ 是避免能量发散的时间截断函数,其中对于时间 $t \geq 0$, $\theta(t) = 1$,对于时间 $t < 0$, $\theta(t) = 0$ 。

通过使用傅里叶变换,截断的复频波可以展开至实频域 $1/2\pi i(\tilde{\omega} - \omega')$,其表现为洛伦兹线型。在时间域的最终电场可以表示为:

$$E_T(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{i(\tilde{\omega} - \omega')} e^{-i\omega't} d\omega', \text{ 其中 } 1/i(\tilde{\omega} - \omega') \text{ 为傅里叶系数。自然地,由截}$$

断的复频波激发的系统中的任何响应 $F(\tilde{\omega})$ (例如电场强度、磁场强度等)
30 都可以表示为处于准稳态的实频响应的积分

$$F(\tilde{\omega}) \approx \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega') \frac{1}{i(\tilde{\omega} - \omega')} e^{i(\tilde{\omega} - \omega')t} d\omega' / 2\pi. \text{ 实际上,对于足够宽的光谱范围,上}$$

述积分可以离散化为:

$$F(\tilde{\omega}, r, t) \approx \sum_i F(\omega'_i, r) e^{-i\omega'_i t} \Delta\omega / (2\pi i(\tilde{\omega} - \omega'_i)) \quad (6)$$

其中, $F(\tilde{\omega}, r, t)$ 可以是表征波传播的任何物理量,例如电场强度、磁场强度等。 ω'_i 为实频率, $F(\omega'_i, r)$ 是实频率 ω'_i 下的实频率响应,其中 i 为正整数, r

为波的位置，例如一维或二维坐标。可以基于多个实频率 ω'_i 下的测量和/或计算结果 $F(\omega'_i, r)$ 来计算 $F(\tilde{\omega}, r, t)$ 。离散频率 $\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_i$ 是等间隔的，其间隔为 $\Delta\omega$ 。复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$ ，将复频率 $\tilde{\omega}$ 代入上述公式(6)中，即可至少部分抵消本征损耗。

5 基于上述内容，可以通过复频率方法显著增强高度受限的极化激元的衰减长度，恢复仅受噪声水平限制的近乎无损的传播。然而本领域技术人员应当理解，通过合成复频波增加衰减长度的方法也可以应用到其他频率范围和其他类型的波，包括但不限于声波和弹性波。

10 基于上述内容，本发明提供了一种通过合成复频波补偿波在介质传播中的损耗的方法，图1示出了该方法的流程图，该方法包括：

步骤 S101：基于波传播的测量结果获得实频率响应。

波传播的测量结果可以是在一定位置处波的强度，例如波的振幅，电场强度，磁场强度等。

其中，基于一段时间内多个波传播的测量结果获得多个实频率响应。

15 步骤 S102：基于波的频率和介质的介电常数选择复频率，以至少部分抵消波传播中的面内波矢的虚部。

在一个实施例中，复频率被选择为使得面内波矢的虚部为零或趋近于零。在一个实施例中，可以通过上述公式(5)和公式(6)计算得到复频率的虚部的值。

20 步骤 S103：基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗。

在一个实施例中，可以基于上述公式(6)计算复频率响应。在另一个实施例中，可以基于积分公式计算复频率响应，积分公式可以例如是

$$F(\tilde{\omega}) \approx \int_a^b F(\omega') \frac{1}{i(\tilde{\omega} - \omega')} e^{i(\tilde{\omega} - \omega')t} d\omega' / 2\pi, \text{其中积分下限 } a \text{ 小于复频率 } \tilde{\omega} \text{ 的实部，积}$$

25 分上限 b 大于复频率 $\tilde{\omega}$ 的实部。本领域技术人员应当理解，可以对上述公式(6)以及上述积分公式进行修改或改动，均能达到抵消或补偿波传播中的损耗的效果，因此上述修改或改动均属于本发明的保护范围。也就是说，凡是基于多个实频率响应的组合获得复频率响应的方法，均在本发明的保护范围内。

30 在一个实施例中，假设由德鲁德模型描述的真实等离子体金属的介电常数为 $\varepsilon = 5 - \omega_p^2/(\omega^2 + i\omega\gamma)$ ，其中 $\omega_p = 1.442 \times 10^{16} \text{ Hz}$ ， $\gamma = 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。该金

属支持低于等离激元频率的 SPP。放置在平面等离子体金属上的无限长天线在光照射下充当 SPP 源。图 2A 示出了 SPP 的激发场分布。随着频率增加，SPP 的传播距离减小，这意味着较高频率的 SPP 由于对界面的限制更强，因此具有更短的传播长度。图 2B 示出了 SPP 相应的傅里叶分布。结果表明，高频模式变得模糊并最终变得不可见。因此，需要通过利用复频率来平衡等离子体损耗，以实现无损传播。可以通过实频率场分布的线性组合来合成复频率场分布，

$$E(\tilde{\omega}, r, t) = \sum_i E(\omega'_i, r) e^{-i\omega'_i t} \Delta\omega / (2\pi i(\tilde{\omega} - \omega'_i)) \quad (7)$$

其中复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$ ， β 的值由公式 (4) 获得， E 为波的电场强度， r 为波的位置，例如一维或者二维坐标。图 2C 示出了复频率激励下的色散，完全恢复了较高频率下的色散。图 2D 示出了 $\tilde{f} = (700 - 42.3i)$ THz（其实部由图 2C 中底部虚线表示）处的复频率激励在不同时刻的动态演化。随着时间的增加，传播距离线性延伸，但幅度在不同位置保持均匀。这可视化地提供了表面等离极化激元在复频率下的无损传播，其与实频率下的传播形成鲜明对比。图 2E 示出了在 $t = 5.5 \times 10^{-2}$ ps 处相应的空间场分布，图 2E 的上半部分示出了 $\tilde{f} = (700 - 6.73i)$ THz 的空间场分布，图 2E 的下半部分示出了 $\tilde{f} = (850 - 17i)$ THz（其实部由图 2C 中上部虚线表示）的空间场分布。如图 2E 所示，与实频率情况相比，衰减要慢得多。

损耗的补偿不仅适用于德鲁德模型描述的金属，还适用于具有更复杂介电功能材料，例如支持 PhP 的范德华材料。对于 PhP，也会存在满足 $Im(k)=0$ 的特定复频率解。

在一个实施例中，使用六方氮化硼（hBN）薄膜，其支持面内各向同性 PhP，并且可以利用复频率来补偿其本征损耗，以观察声子极化激元的无损传播。图 3A 示出了基于散射式扫描近场光学显微镜（s-SNOM）技术的实验装置。放置在 hBN 薄膜上的长金天线用于发射 1D PhP。在 1421 cm^{-1} 至 1503 cm^{-1} 的频率范围内测量电场分布，步长为 2 cm^{-1} 。选择实频率为 1451 cm^{-1} 和 1477 cm^{-1} 的两个场分布作为中心频率，合成 $\tilde{f}_1 = (1451 - 4.5i) \text{ cm}^{-1}$ 和 $\tilde{f}_2 = (1477 - 6i) \text{ cm}^{-1}$ 处的复频率响应。相应的虚部表示针对每个频率的优化值。图 3B 示出了两个实频率的场分布，图 3C 示出了两个复频率的场分布。实验结果表明，实频率下的传播衰减很强，复频率下极化激元的传播几乎是耗散的。

在一个实施例中，使用复频率方法来研究由范德华晶体 $\alpha-\text{MoO}_3$ (MoO_3)薄膜支持的更复杂场分布的时间演化，该薄膜具有高度各向异性并支持自然面内双曲极化激元。将金天线放置在 MoO_3 薄膜上以激发 PhP。图 4 示出了原子力显微镜(AFM)图像，其示出了在不同频率下 SNOM 测量的 MoO_3 界面上的近场分布。总体频率范围为 $891\text{--}943\text{ cm}^{-1}$ ，间隔为 1 cm^{-1} 。场分布变化表现出具有凹波前的特征双曲线传播行为。随着频率的增加，波长减小，场限制更强，同时传播衰减更强。在所有测量的频率下，由于材料显著的本征损耗，极化激元的衰减长度小于两个波长。

图 5A 示出了复频率 $(910 - 6.5i)\text{ cm}^{-1}$ 在不同时间的合成电场分布，时间步长为 0.53 ps ，总频率数为 53。对于较小的 t ，噪声在很大程度上通过多频率信号的求和而被平滑。随着时间的推移，波向上传播得越来越远，远远超出了实频率下两个波长的衰减长度。二维场图在 4.24 ps 左右达到最佳，传播长度为 $8.7\mu\text{m}$ (沿垂直方向)，而中心实频率对应的传播长度仅为 $1.6\mu\text{m}$ 。因此，与中心实频率相比，这种复频率方法下的传播长度增加了四倍以上。通过进一步增加 t ，随着信号在时域中继续衰减，噪声开始占主导地位。当时间超过 4.77 ps 时，场分布开始表现出混乱。因此，在决定在复频域中构造波的最佳时间时，需要在较长的传播和信噪比之间进行权衡。

本发明人还研究了频率点数量 (即离散频率 ω_i' 的数量) 的影响，图 5B 示出了不同合成频率数的成像图案，其中，中心频率固定为 910 cm^{-1} ，频率间隔固定为 1 cm^{-1} ，时间快照固定为 4.24 ps 。很明显，9 个频率点的场图与实频率相比已经有了显著的改善。随着频率数量增加到 21，衰减长度显著增加。然而，进一步增加到 39 个并没有带来明显的改善。

在一个实施例中，使用复频率方法来研究 PhP 的干涉行为。在 MoO_3 薄膜上制作两个不同直径 ($0.8\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$) 的圆形天线以激发声子极化激元，图 6A 示出了实验样品的原子力显微镜图像。使用 s-SNOM 探针扫描白色虚线框内的场分布，频率为 $f = 990\text{ cm}^{-1}$ 时电场分布的幅度和实部分别如图 6B 的上图和下图所示。从两个天线发出的 PhP 相向传播，但由于衰减，它们不会形成可辨别的干涉条纹。通过合成复频率 $\tilde{f} = (990 - 2i)\text{ cm}^{-1}$ 下的场图， MoO_3 薄膜中的本征损耗得到补偿，从而使 PhP 的传播时间更长。这有利于天线之间形成清晰的干涉图案，如图 6C 所示。

实现极化激元近乎无损的传播具有重要意义。极化激元的无损传播可

以用于光子集成电路的开发，其中长距离传输信号的能力对于确保电路的性能和可靠性至关重要，同时也有益于包括光子电路、波导和等离子体/声子结构照明显微镜在内的应用。

5 本发明的通过合成复频波补偿波传播中的损耗的方法，通过具有虚拟增益的复频率以及多个实频率响应合成复频波，能够补偿波传播中的损耗，以实现波的无损传播。

虽然本发明已经通过优选实施例进行了描述，然而本发明并非局限于这里所描述的实施例，在不脱离本发明范围的情况下还包括所作出的各种改变以及变化。

权利要求书

1.一种补偿波传播中的损耗的方法，包括：

基于波传播的测量结果获得实频率响应；

5 基于波的频率和介质的介电常数选择复频率，以至少部分抵消波传播中的面内波矢的虚部；

基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗。

2.根据权利要求 1 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，基于多个实频率响应和所述复频率获得复频率响应以补偿波传播中的损耗的步骤包括通过以下公式计算复频率响应：

$$F(\tilde{\omega}, r, t) \approx \sum_i F(\omega'_i, r) e^{-i\omega'_i t} \Delta\omega / (2\pi i (\tilde{\omega} - \omega'_i))$$

其中， $F(\omega'_i, r)$ 为实频率响应， $F(\tilde{\omega}, r, t)$ 为复频率响应， ω'_i 为实频率， i 为正整数， $\tilde{\omega}$ 为复频率， t 为时间， $\Delta\omega$ 为实频率 ω'_i 的间隔频率， r 为波的位置。

3.根据权利要求 1 或 2 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，所述波为极化激元，波传播的测量结果为波的电场强度。

4.根据权利要求 3 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，复频率 $\tilde{\omega} = \omega - i\beta$ ， ω 为中心频率， β 为虚拟增益，其被选择为使得面内波矢的虚部为零。

5.根据权利要求 4 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，波在其中传播的介质的介电常数由德鲁德模型描述为 $\epsilon_m = \epsilon_r - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$ ， ϵ_m 为介质的介电常数， ϵ_r 为频率 ω 趋向于无穷时的介电常数， ω_p 为介质层的等离激元频率， γ 为介质层的阻尼率。

6.根据权利要求 5 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中， $\beta \approx \gamma\omega_p^2\omega^2 / (2(\omega_p^2 - \epsilon_r\omega^2)^2 + 2\epsilon_r\omega^4)$ 。

7.根据权利要求 4 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，波在其中传播的介质的介电常数由洛伦兹模型描述为 $\epsilon_m = \epsilon_r - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma - \omega_0^2)$ ， ϵ_m 为介质的介电常数， ϵ_r 为频率 ω 趋向于无穷时的介电常数， ω_p 为介质层的等离激元频率， γ 为介质层的阻尼率， ω_0 为模型的共振频率。

8.根据权利要求 7 所述的补偿波传播中的损耗的方法，其中，

$$\beta \approx 0.5\gamma\omega_p^2\omega^2/(\varepsilon_r(\varepsilon_r+1)(\omega^2-\omega_0^2)^2+(\omega_0^2+2\varepsilon_r(\omega_0^2-\omega^2))\omega_p^2+\omega_p^4)。$$

- 5 9.一种计算机可读存储介质，其特征在于，其上包含有计算机程序，所述计算机程序能够被处理器执行以实现权利要求 1-8 之一所述方法的步骤。

10.一种电子设备，其特征在于，包括：

一个或多个处理器；以及

存储器，用于存储一个或多个可执行指令；

- 10 所述一个或多个处理器被配置为经由执行所述一个或多个可执行指令以实现权利要求 1-8 之一所述方法的步骤。

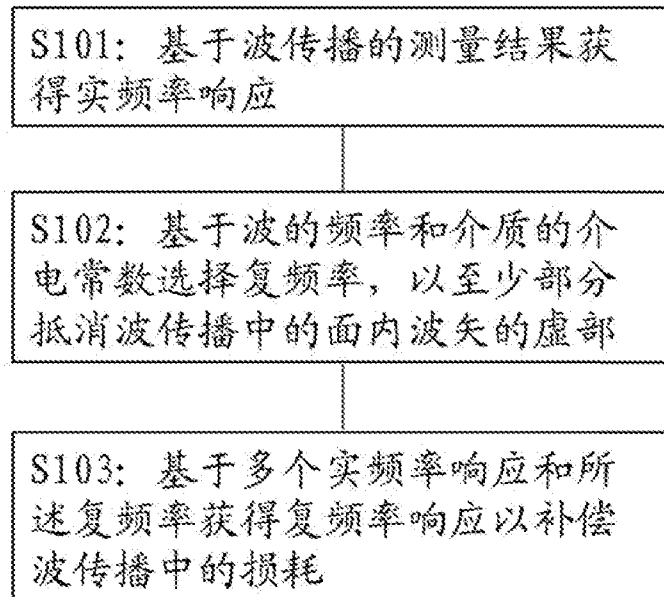


图 1

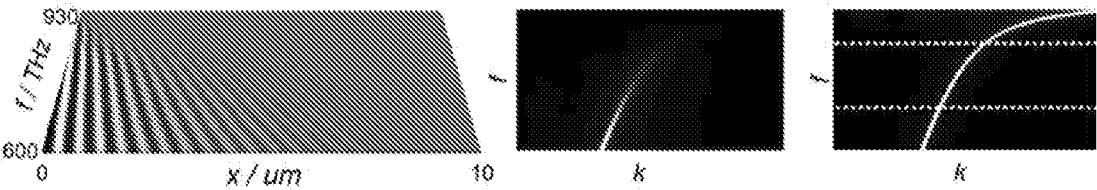


图 2A

图 2B

图 2C

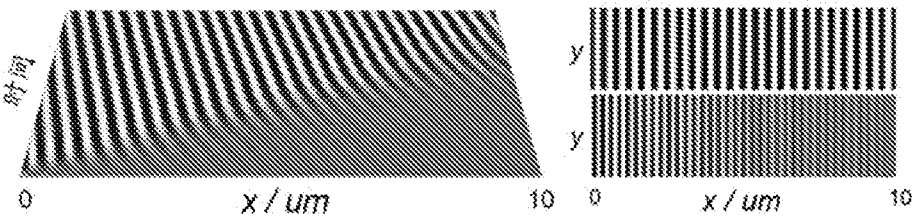


图 2D

图 2E

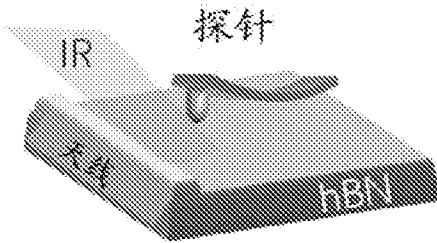


图 3A

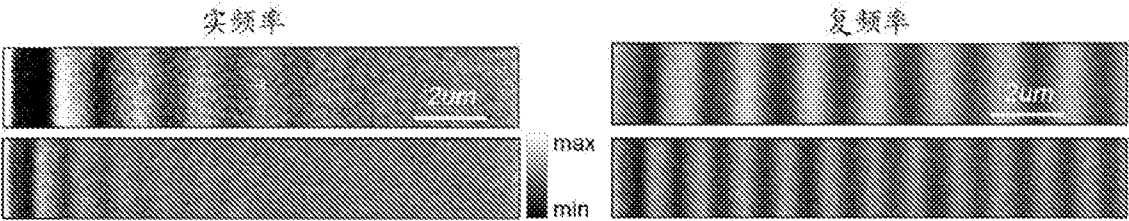


图 3B

图 3C

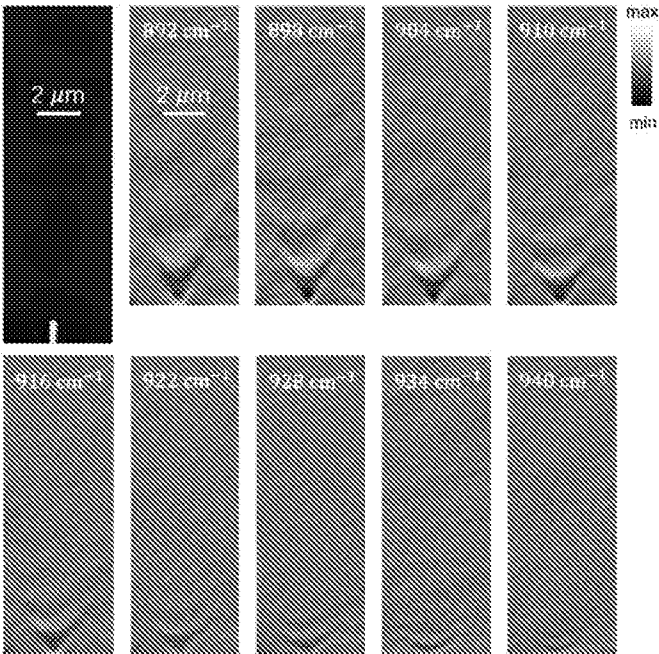
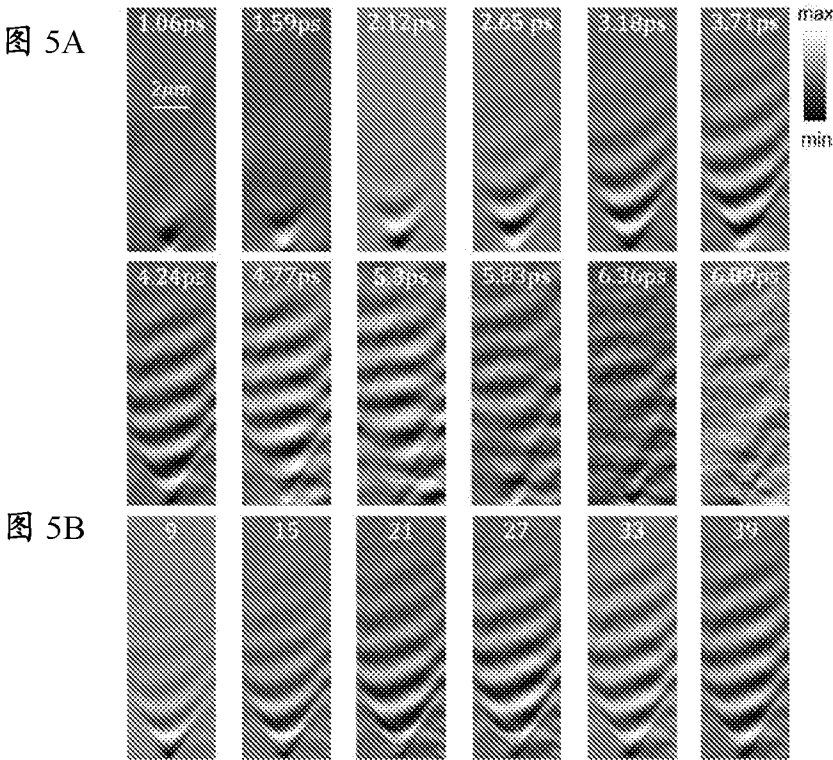


图 4



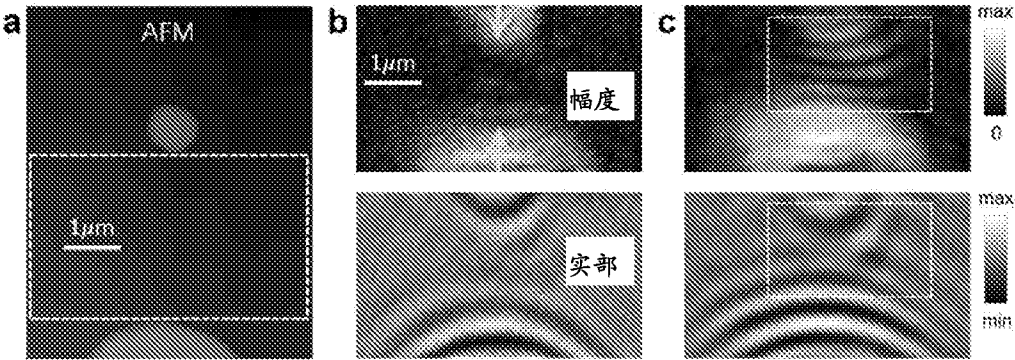


图 6A

图 6B

图 6C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2024/103061

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04B 11/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: H04B G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT; ENTXT; ENTXTC; VEN; DWPI; CNKI; IEEE: 极化激元, 电磁波, 补偿, 均衡, 平衡, 抵消, 损耗, 损失, 复频率, 实频率, 响应, 介质, 虚部, polariton, electromagnetic wave, compensation, equalization, balancing, cancellation, loss, complex frequency, real frequency, response, medium, imaginary part

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105759326 A (NORTH UNIVERSITY OF CHINA) 13 July 2016 (2016-07-13) description, paragraphs [0016]-[0023]	1-10
A	CN 103344709 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 09 October 2013 (2013-10-09) entire document	1-10
A	US 2009219623 A1 (SHALAEV Vladimir M. et al.) 03 September 2009 (2009-09-03) entire document	1-10
A	US 2010060977 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 11 March 2010 (2010-03-11) entire document	1-10
A	范辉颖 等 (FAN, Huiying et al.). "非厄密电磁超表面研究进展 (Research Progress of Non-Hermitian Electromagnetic Metasurfaces)" 物理学报 (Acta Physica Sinica), 31 December 2022 (2022-12-31), entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"D" document cited by the applicant in the international application

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 October 2024

Date of mailing of the international search report

12 October 2024

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2024/103061

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	105759326	A	13 July 2016	None			
CN	103344709	A	09 October 2013	None			
US	2009219623	A1	03 September 2009	EP	1991496	A2	19 November 2008
				WO	2007103077	A2	13 September 2007
US	2010060977	A1	11 March 2010	WO	2010008638	A2	21 January 2010

A. 主题的分类

H04B 11/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: H04B G02B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNTEXT;ENTEXT;ENTXTC;VEN;DWPI;CNKI;IEEE:极化激元, 电磁波, 补偿, 均衡, 平衡, 抵消, 损耗, 损失, 复频率, 实频率, 响应, 介质, 虚部, polariton, electromagnetic wave, compensation, equalization, balancing, cancellation, loss, complex frequency, real frequency, response, medium, imaginary part

C. 相关文件

类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 105759326 A (中北大学) 2016年7月13日 (2016 - 07 - 13) 说明书第[0016]–[0023]段	1–10
A	CN 103344709 A (南京航空航天大学) 2013年10月9日 (2013 - 10 - 09) 全文	1–10
A	US 2009219623 A1 (SHALAEV Vladimir M. 等) 2009年9月3日 (2009 - 09 - 03) 全文	1–10
A	US 2010060977 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 2010年3月11日 (2010 - 03 - 11) 全文	1–10
A	范辉颖 等. "非厄密电磁超表面研究进展" 物理学报, 2022年12月31日 (2022 - 12 - 31), 全文	1–10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

★ 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2024年10月8日

国际检索报告邮寄日期

2024年10月12日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

张倩

电话号码 (+86) 010-53961574

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/103061

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105759326	A	2016年7月13日	无			
CN	103344709	A	2013年10月9日	无			
US	2009219623	A1	2009年9月3日	EP	1991496	A2	2008年11月19日
				WO	2007103077	A2	2007年9月13日
US	2010060977	A1	2010年3月11日	WO	2010008638	A2	2010年1月21日