

## 基于电磁诱导透明的双控多功能超表面

刘海\*, 赵佳明, 陈聪, 高鹏, 戴耀威, 路翔宇, 万寅辉, 王馨艳, 赵思怡

中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 提出了一种基于电磁诱导透明(EIT)的多功能偏振无关超表面,其基础结构由1个金属十字结构和4个方环结构组成,并引入了可调控材料硅(Si)以及二氧化钒( $\text{VO}_2$ ),以实现温光双控。利用模拟计算和理论模型分析得到了基础结构作为双明模间接耦合形成EIT透明窗口的结论。由于EIT以及可调控材料的特性,本设计可以在分子传感、可控慢光以及双通道温光双控开关等领域实现应用,并且具有优异的性能。该结构对蔗糖溶液的传感灵敏度为 $97.6 \text{ GHz}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,在分子检测领域展示出了巨大潜力。该结构实现了对慢光效应的可选择控制。依据EIT的作用机理,提出了利用可调控材料改变结构谐振进而控制电磁响应的设计思路,并实现了一种双通道温光双控开关,为今后的EIT超表面设计提供了参考。

**关键词** 表面光学; 超表面; 可调控材料; 分子传感; 慢光效应; 温光双控开关

中图分类号 TN82 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231174

## 1 引言

近年来,超表面蓬勃发展,国内外科研团队聚焦在这一领域进行了大量研究。利用超表面独特的电磁特性,研究人员设计了许多新型功能器件,例如吸收器<sup>[1]</sup>、极化转换器<sup>[2]</sup>、传感器<sup>[3-4]</sup>等。超表面与电磁波相互作用后会产生独特的电磁现象,例如负折射<sup>[5]</sup>、Fano共振<sup>[6]</sup>、电磁诱导透明(EIT)等物理现象。其中,EIT现象在具有三能级分布的原子系统中被首次发现,是系统中不同传输路径的强耦合光束之间的一种破坏性干涉现象,可使最初不透明的介质变得透明<sup>[7]</sup>。EIT具有较强的色散效应和慢光效应,这意味着EIT在慢光器件和光存储中有着巨大的应用潜力。然而,原子系统中EIT的实现对外部条件的要求极其严格,如超低温环境、强泵浦光等,这些都限制了它的实际应用和发展<sup>[8]</sup>。随着超表面研究的兴起,EIT现象可以通过超表面实现。研究表明,超表面实现EIT主要有两种方式,一是明模与明模之间间接耦合,二是明模与暗模直接耦合<sup>[9-10]</sup>。EIT超表面主要应用在传感器件和慢光器件的设计中,近些年来相关的研究逐渐丰富<sup>[11-13]</sup>。Zhang等<sup>[14]</sup>提出了一种由切断导线和分裂环谐振器组成的超表面,并基于该超表面完成了对胶质瘤细胞的检测,实现了对不同胶质瘤细胞的分别检测,检测灵敏度达到了 $496.01 \text{ GHz}/\text{RIU}$ 。Zhao课题组<sup>[15]</sup>利用不对称分环谐振器与切断线结构,通过改变间隙距离,将群时延由 $20 \text{ ps}$ 增加至 $30 \text{ ps}$ 。

大部分研究人员在设计超表面结构时选取了金属等不可调控材料,导致设计功能局限在EIT特性中,只有固定的电磁响应,从而极大地限制了EIT超表面的工作场景,阻碍了相关研究的进一步发展。许多研究人员将目光聚焦到了可调控材料,例如二氧化钒<sup>[16]</sup>、石墨烯<sup>[17]</sup>以及光敏材料。光敏硅由于工艺成熟、量子效率高、兼容性好而备受关注<sup>[18]</sup>。引入光敏材料的超表面研究近些年层出不穷,在可切换吸收器/极化转换器<sup>[19]</sup>、光开关<sup>[20]</sup>、空间编码<sup>[21]</sup>等领域均有报道。二氧化钒是一种新兴的相变材料,已成为目前的研究热点。二氧化钒在 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时由绝缘态变至金属态,基于这一性质近些年出现了编码超表面<sup>[22]</sup>、超透镜<sup>[23]</sup>等研究报道。

笔者将可调控材料引入EIT超表面设计中,提出了一种基于电磁诱导透明的多功能偏振无关超表面。该超表面将多种功能集成在一种结构中,可以实现对蔗糖溶剂的传感测量、可控的慢光效应以及温光双控开关,在分子检测领域、慢光器件以及光传输领域均有一定的应用价值。本文展示的利用可调控材料改变结构谐振从而控制电磁响应的设计思路,对于EIT超表面的实现具有一定的参考价值。

## 2 结构设计及原理

## 2.1 结构设计

所设计的超表面基础单元结构由金属十字结构和4个方环结构组成。如图1所示,超表面为双层结构,

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-10-20; 录用日期: 2023-11-16; 网络首发日期: 2023-12-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2902702)、国家自然科学基金(51874301)

通信作者: \*lhust@hotmail.com

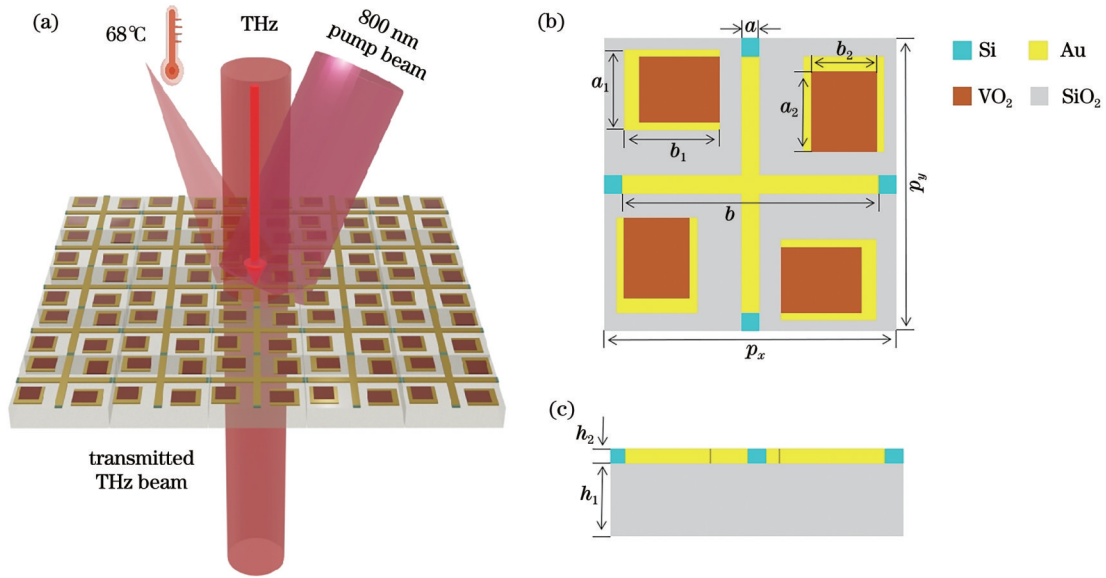


图 1 结构示意图。(a)三维示意图;(b)俯视图;(c)正视图

Fig. 1 Structure diagrams. (a) Three-dimensional schematic diagram; (b) vertical view; (c) front view

顶层为十字结构和 4 个方环结构,材料选取 CST 材料库中的金,其电导率为  $4.56 \times 10^7$  S/m,类型为损耗金属<sup>[24]</sup>。同时,在十字结构边缘沉积了光敏硅材料,其介电常数  $\epsilon_{Si}$  为 11.7<sup>[25]</sup>。方环内嵌了二氧化钒材料,其介电常数由 Drude 模型确定。超表面层厚度均一致<sup>[26]</sup>。底层为介质层,采用二氧化硅材料,其介电常数为 3.75。基本单元为  $p_x \times p_y$  的周期单元,主要结构参数如表 1 所示。

在设计基础结构时,首先确定了作为阵列联通结构的竖条结构。竖条结构被视为明模,可以被电磁波激发。为了产生干涉相消从而诱发 EIT 现象,需要将另一组结构作为明模,并且谐振位置在十字结构附近。图 2(a)、(b)对比了方环和半圆环对应的响应情况。在基本参数和位置都保持一致的情况下,方环与竖条结构的响应具有更窄的半峰全宽以及更高的品质因数(品质因数)。考虑到传感器的需求,EIT 透明窗口应该窄而尖,因此选择方环作为另一组明模结构。当不同模式的线偏振光入射时,竖条与方环结构响应对偏

表 1 结构参数  
Table 1 Structure parameters

Parameter	Value / $\mu\text{m}$
$p_x$	140
$p_y$	140
$h_1$	5
$h_2$	0.2
$a$	11
$b$	132
$a_1$	40
$b_1$	43
$a_2$	35
$b_2$	30

振敏感,工作在横电模式(TE 模式)。为了解决这个问题,将竖条补充为十字结构,方环结构由 2 个增加至 4 个,如图 2(c)所示,此时 EIT 产生的透明窗口仍然是

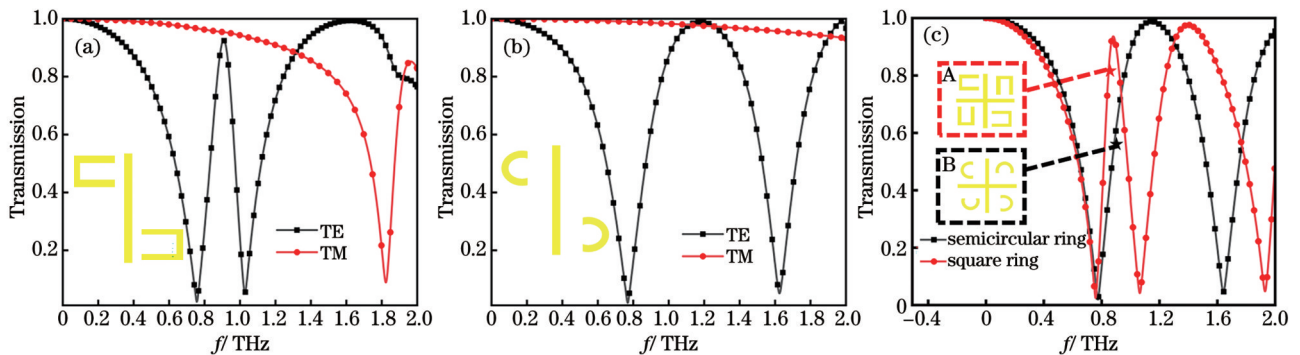


图 2 不同结构对应的响应曲线。(a)竖条与方环结构;(b)竖条与圆环结构;(c)十字与方环结构

Fig. 2 Response curves corresponding to different structures. (a) Vertical bar and square ring structure; (b) vertical bar and circular ring structure; (c) cross and square ring structure

方环结构更加尖锐。因此,确定十字结构和方环结构为设计的最终模型。对于偏振不敏感性质,将在后文进行讨论。

这里选取部分重要的结构参数来说明结构优化的过程。如图 3 所示,当不同结构参数发生改变时,超表

面的响应曲线会受到较大影响。这是由于结构参数发生改变后,组件结构的谐振会发生改变。谐振位置以及强度的变化影响了组件结构间相互干涉的能力,导致透明窗口发生变化。因此,通过对结构参数进行调整,可以找到满足本文设计需求的合适的透明窗口。

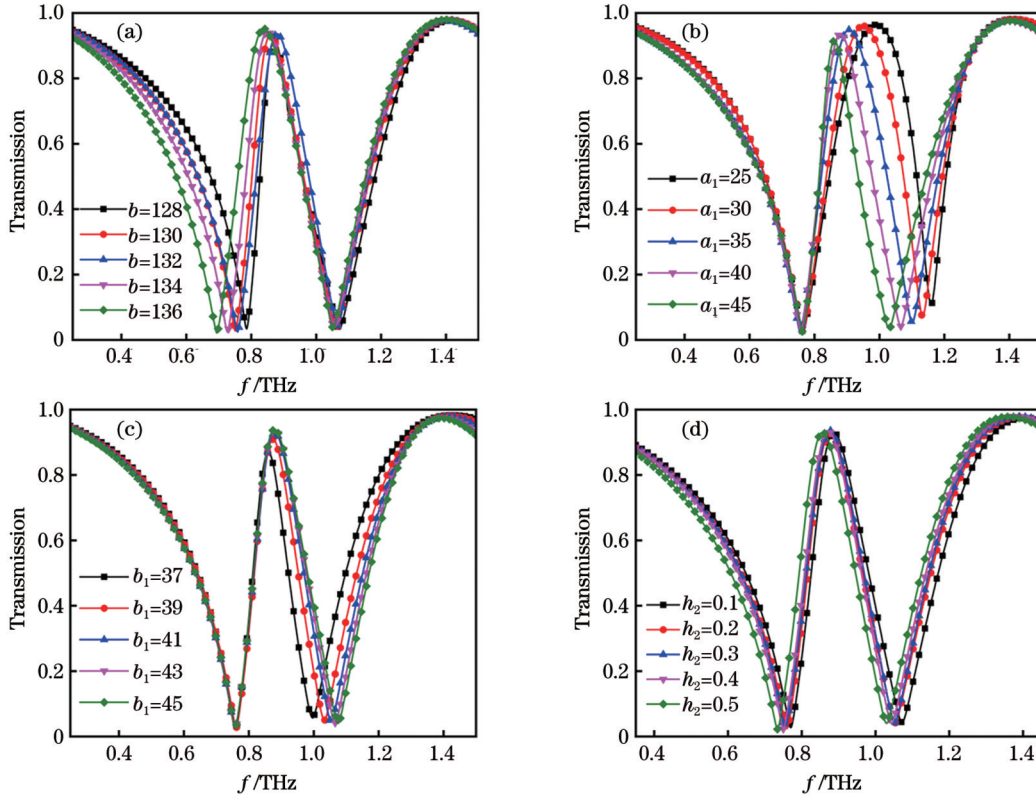


图 3 不同结构参数的响应曲线。(a) 十字结构长度; (b) 方环结构外宽度; (c) 方环结构外长度; (d) 超表面厚度  
Fig. 3 Response curves of different structural parameters. (a) The length of cross structure; (b) external width of the square ring structure; (c) external length of the square ring structure; (d) the thickness of the metasurface

采用频域全波算法(CST)进行仿真,电磁波沿着  $z$  方向入射,设置为开放端口。 $x$ 、 $y$  方向设置为周期条件,求解器选用频域求解器。

### 2.2 超表面 EIT 的形成机理以及偏振无关分析

为探究超表面 EIT 的形成机理以及超表面在太赫兹波段的响应情况,分别对结构组件(十字结构和方环结构)进行分析计算。如图 4 所示:A 曲线为十字结构的响应曲线,其谐振峰位置位于 0.786 THz 处;B 曲线为 4 个方环结构的电磁响应曲线,其对应的谐振位置在 1.026 THz 处。两个结构的电磁响应位置不同,当共同作用时会发生相消干涉,从而产生了透明窗口,如 C 曲线所示,其透明窗口位于 0.88 THz 处,幅值为 0.936。

同时,基于明暗模理论对超表面 EIT 现象的形成机理进行进一步解释。可以根据品质因数来判断结构组件的模式。一般来说,明模结构是在偶极子共振状态下与电磁波耦合的结构,品质因数较低;暗模则无法与入射电磁波发生直接耦合,品质因数更高。品质因数越小,超表面结构受到电磁波辐射的激励就越

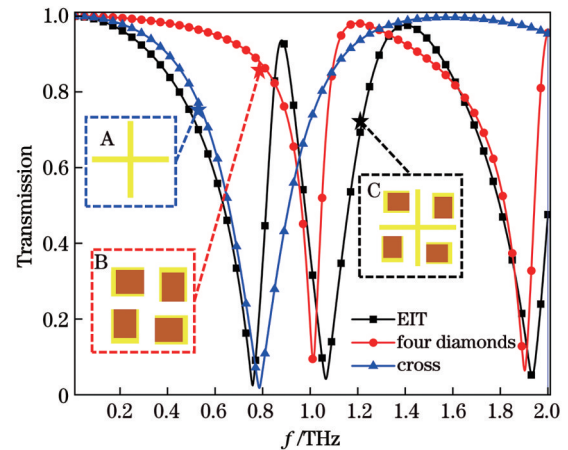


图 4 不同组件结构的电磁响应曲线  
Fig. 4 Electromagnetic response curves of different component structures

大,其电磁损耗也就越大。品质因数的计算公式为

$$Q = \frac{f}{\zeta_{FWHM}}, \quad (1)$$

式中: $f$ 为结构响应曲线的谐振频率; $\zeta_{FWHM}$ 为响应曲线

的半峰全宽。经过计算,十字结构的品质因数为 3.1,方环结构的品质因数为 13.7。因此,在太赫兹波入射下,两个结构均能够直接被激发,可被视作明模结构。两个明模间接耦合影响了谐振响应,从而产生了透明窗口。

为了进一步阐述 EIT 的形成机理,笔者对透明窗口及其前后波谷的近场电场进行了分析计算,结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)为 TE 模式的太赫兹波入射时的电场分布,可见:在 0.758 THz 处,电场主要分布

在十字结构的纵向两端,形成电偶极子谐振;在 1.066 THz 处,电场主要分布在 a、b 两个方环开口处。由于两个结构的谐振频率相近,二者之间发生了干涉相消,导致产生了共振吸收最大的谐振峰,即透明窗口。由于两个结构均能被电磁波激发产生谐振,所以这两个结构作为明模发生间接耦合,导致 0.88 THz 处的谐振响应近乎消失,表现为电场分布基本消失,如图 5(b)所示。

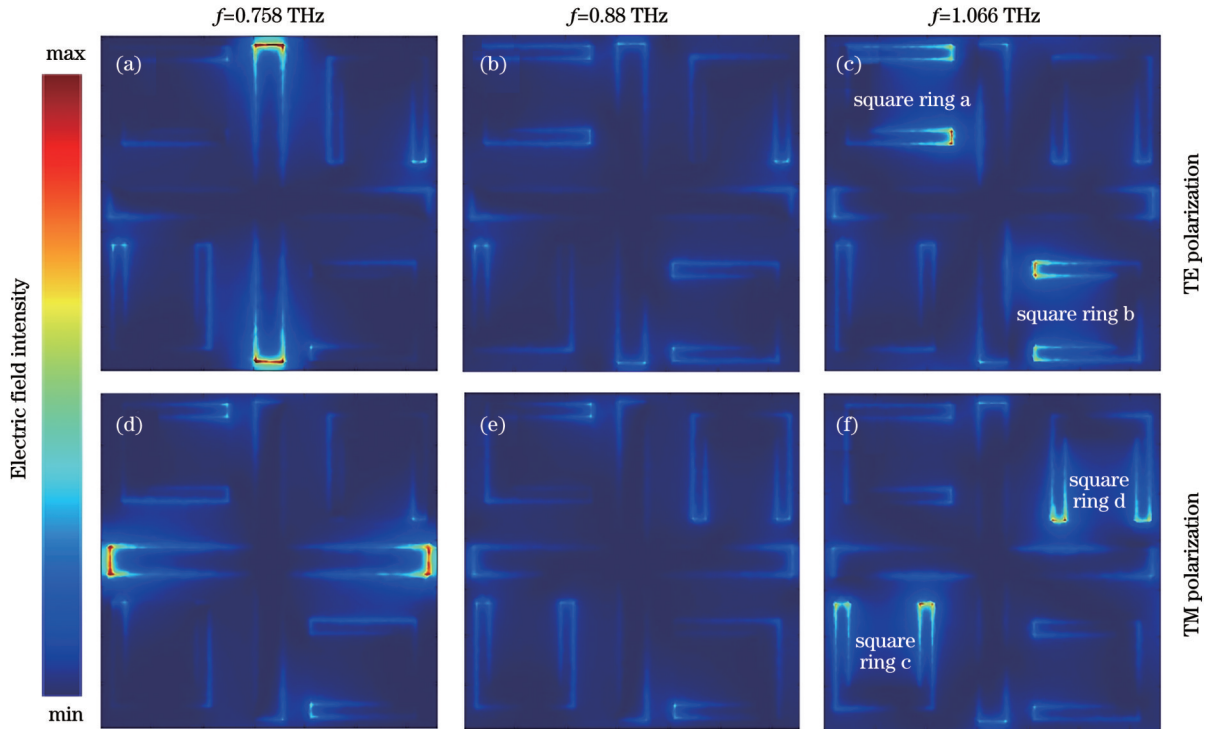


图 5 不同偏振电磁波入射下三个频率处的近场电场分布图。(a) TE 模式下 0.758 THz 处的电场分布;(b) TE 模式下 0.88 THz 处的电场分布;(c) TE 模式下 1.066 THz 处的电场分布;(d) TM 模式下 0.758 THz 处的电场分布;(e) TM 模式下 0.88 THz 处的电场分布;(f) TM 模式下 1.066 THz 处的电场分布

Fig. 5 Near-field electric field distributions under different polarization electromagnetic waves incident at three frequencies. (a) Electric field distribution at 0.758 THz in TE mode; (b) electric field distribution at 0.88 THz in TE mode; (c) electric field distribution at 1.066 THz in TE mode; (d) electric field distribution at 0.758 THz in TM mode; (e) electric field distribution at 0.88 THz in TM mode; (f) electric field distribution at 1.066 THz in TM mode

图 5(d)~(f)为 TM 模式的太赫兹波入射时的电场分布。与 TE 模式相比,十字结构的电场分布位置变成了横向两端,方环结构的电场则分布在方环 c、d 的开口处。两种模式在 0.88 THz 处的电场强度相等,这也就意味着所设计的结构对入射电磁波具有偏振不敏感性。如图 6 所示,两种模式太赫兹波入射时的响应曲线完全一致,偏振不敏感性降低了实际应用时的入射条件,也有利于应对各种复杂的使用场景。

为了解释电磁感应透明的形成,这里引入洛伦兹共振模型来解释两种共振模式的耦合效应,即

$$\begin{cases} \ddot{x}_1(t) + \gamma_1 \dot{x}_1(t) + \omega_1^2 x_1(t) + \kappa x_2(t) = E(t) \\ \ddot{x}_2(t) + \gamma_2 \dot{x}_2(t) + \omega_2^2 x_2(t) + \kappa x_1(t) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  表示两种不同的谐振模式;  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  表

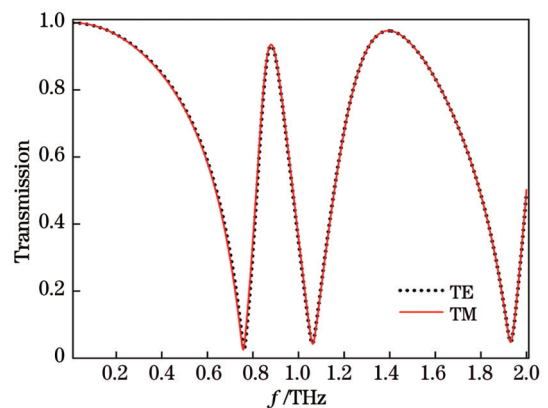


图 6 不同偏振入射情况下的响应曲线  
Fig. 6 Response curves under different polarization incidence conditions

示相应的阻尼系数;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  表示对应的固有谐振频率;  $\kappa$  是耦合系数。对式(2)进行傅里叶变换可以得到

$$\begin{pmatrix} \omega_1^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_1 & \kappa \\ \kappa & \omega_2^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中  $\omega$  是所施加电磁场的驱动频率。通过求解式(3)可以获得振幅的表达式为

$$A = E(t) \frac{\omega_2^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_2}{(\omega_2^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_2)(\omega_1^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_1) - \kappa^2}, \quad (4)$$

从而可以得到透射幅值公式为

$$T = 1 - \left| \frac{A}{E(t)} \right|^2. \quad (5)$$

所设计结构中的十字结构和方环结构对应两种谐振模式。当两个谐振模式之间的耦合系数为 0 时, 它们之间没有耦合, 此时共振系统对外加电磁波实现最大程度的吸收。随着  $\kappa$  增大, 耦合作用增强, 两种谐振模式发生干涉相消, 共振系统对外加电磁波的吸收减小, 导致电磁感应透明现象产生。

### 2.3 可调控材料原理

在十字结构两端以及方环结构内引入了光敏材料硅与二氧化钒。光敏硅的电导率主要取决于光束功率。当入射光的光照能量高于光敏材料的带隙能量时, 就会产生多余的载流子, 形成电流。基于光对载流子的激发, 结构中光敏硅的电导率增加, 从而使得超表面的等效电容减小, 最终影响太赫兹波的散射。光激发载流子的密度与入射光束的泵浦功率成正比, 因此改变光功率可以改变光敏材料的电导率。在实际应用中通常选取 800 nm 的近红外激光脉冲作为泵浦光束对光敏硅进行激发。光泵浦和太赫兹光束之间的延迟被设定为大约 5 ps, 以便使光激发发生在太赫兹光束到达之前, 从而保证硅载流子处于准稳态<sup>[27]</sup>。光敏硅的电导率与泵浦光功率之间的数学关系为

$$\sigma_{\text{Si}} = 0.425I^2 + 208I + 1, \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\text{Si}}$  为光敏硅的电导率;  $I$  为泵浦光功率。

二氧化钒在室温时为金红石晶体结构, 表现为绝缘态。当温度升至 68 °C 时, 二氧化钒变为单斜晶体结构, 此时表现为金属态, 电导率急剧升高。二氧化钒的这种相变特性是可逆的, 这意味可以通过控制温度变化来控制二氧化钒材料的金属/非金属态, 以达到功能切换的设计目的。当二氧化钒处于绝缘态时, 设置电导率  $\sigma = 10 \text{ S/m}$ ; 当处于金属态时, 设置电导率  $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 。二氧化钒的材料介电特性可以用 Drude 模型描述为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon' + i\epsilon'' = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{(\omega^2 + i\gamma\omega)}, \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_\infty$  为高频介电常数,  $\epsilon_\infty = 12$ ;  $\gamma$  为碰撞频率,  $\gamma =$

$5.75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ ;  $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$  取决于超表面等离子体频率, 其中  $\sigma_0 = 3 \times 10^{15} \text{ S/m}$ ,  $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15} \text{ S/m}$ <sup>[28]</sup>。

### 2.4 可控材料调控独立性讨论

由于二氧化钒材料同样可以受光激发, 因此引入的光敏硅以及二氧化钒材料能否相互独立激发, 成为了实现温/光双控的重点。二氧化钒材料被脉冲激光辐射时, 其性质变化与其本身厚度、元素掺杂以及激光波长等因素有关<sup>[29-30]</sup>。对于二氧化钒, 目前主要使用 1036 nm 脉冲激光进行激发, 这与光敏硅的激发脉冲波长有着较大差异, 并且二氧化钒完成相变需要的脉冲能量为 26.2 mJ/cm<sup>2</sup>, 远大于光敏硅所需的激发能量<sup>[31]</sup>。因此, 这两种材料的激发有着较好的隔离度, 能够实现单独调控, 从而实现自由的功能调控。

## 3 应用及讨论

前面主要对超表面实现 EIT 现象的机理、偏振无关以及光敏材料特性进行了讨论, 下面重点介绍本设计可以实现的具体应用和功能。一般的 EIT 超表面可以应用于生物分子传感器、慢光器件上。在其基础应用之上, 本设计基于可调控材料, 实现了可单独控制的双通道光开关以及可选择的慢光效应, 大大丰富了该类设计的应用。

### 3.1 传感应用

超表面在太赫兹频段的共振可以等效为等离子体共振<sup>[32]</sup>, 其谐振频率  $\omega_p$  的表达式为

$$\omega_p \propto \frac{1}{2d\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{1}{2d\sqrt{\phi\epsilon_{\text{air}} + (1-\phi)\epsilon_m + \epsilon_{\text{sub}}}}, \quad (8)$$

式中:  $d$  为超表面单元结构的边长;  $\epsilon_{\text{eff}}$  为超表面所处环境的等效介电常数;  $\epsilon_{\text{air}}$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{\text{sub}}$  分别是空气、超表面接触物质、基底的介电常数;  $\phi$  为空气在周围环境中所占的比例。从式(8)可以看出, 当超表面结构接触物质时, 其折射率随物质质量分数的增加而增大, 其介电常数也增大, 谐振频率与介电常数的算术平方根成反比, 因此谐振频率红移。图 7 是环境折射率改变下的响应曲线频移情况, 证明了本设计可以用于传感测量。

选取不同质量分数的蔗糖溶液(溶液体积均为 20 mL)进一步探究所设计超表面的传感特性, 具体检测方法为: 将溶液均匀地涂抹到超表面上, 然后通过氮气通道将其烘干, 使分子结晶析出并附着在结构上。通过检测透射光谱的频移变化来判断检测物质的质量分数。表 2 为蔗糖溶液的相关数据<sup>[33]</sup>。

如图 8(a) 所示, 随着蔗糖溶液密度增加, 传输曲线明显红移。这说明所设计的超表面结构在折射率传感领域有着巨大的应用潜力。对于此类由频移变化界定的传感器件, 衡量其性能的主要参数指标为灵敏度

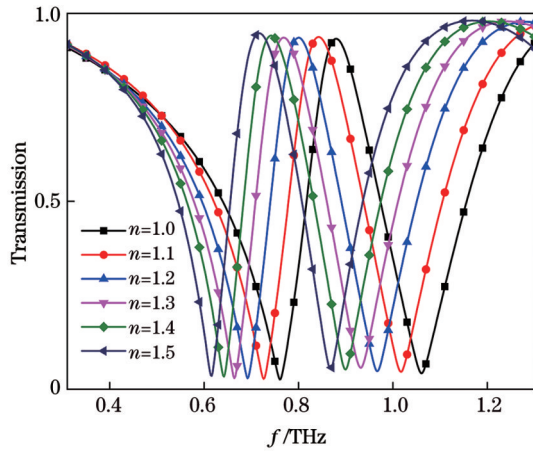


图 7 环境折射率变化对应的频移曲线

Fig. 7 Frequency shift curves corresponding to changes in environmental refractive index

S。S 的计算公式为

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta \rho}, \quad (9)$$

式中： $\Delta f$  为幅值曲线的频移量； $\Delta \rho$  为超表面所接触物质

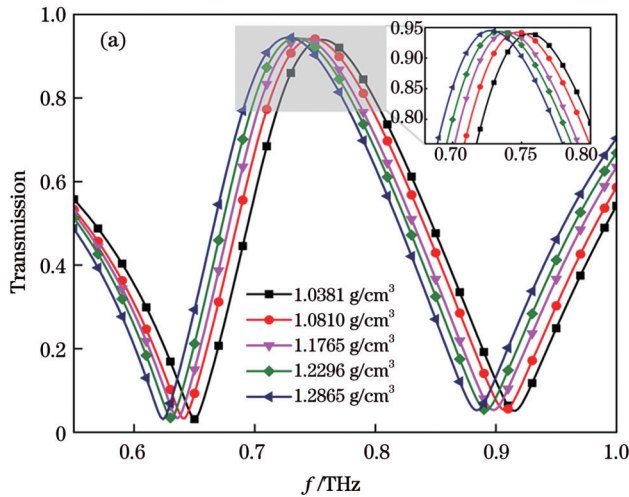


图 8 分子传感性能。(a) 不同密度的蔗糖溶液对应的频移曲线；(b) 密度变化与频移的对应关系

Fig. 8 Molecular sensing performance. (a) Frequency shift curves corresponding to different densities of sucrose solutions; (b) correspondence between density variation and frequency shift

### 3.2 慢光应用

EIT 超表面具有显著的色散效应, 可以产生慢光效应, 因而常被用于慢光器件来减缓光的传播速度<sup>[34]</sup>。慢光效应主要由群折射率  $n_g$  及群时延  $\tau_g$  描述。群时延的计算公式为

$$\tau_g = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \quad (10)$$

式中： $\varphi(\omega)$  为太赫兹透射谱中的透射相位； $\omega$  为其对应的频率。群折射率的计算公式为

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{c}{D} \cdot \tau_g, \quad (11)$$

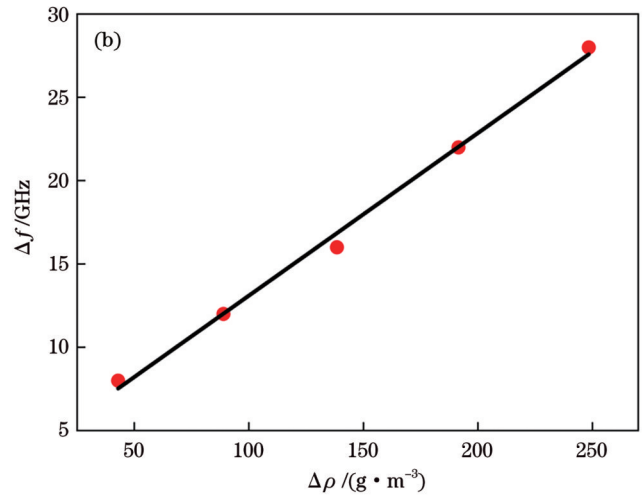
式中： $c$  为真空中的光速； $v_g$  为太赫兹波通过超表面的

表 2 蔗糖溶液的质量分数、密度以及对应的折射率

Table 2 Mass fraction, density, and corresponding refractive index of sucrose solution

Mass fraction / %	Density / (g·cm <sup>-3</sup> )	Refractive index
10	1.0381	1.3532
20	1.0810	1.3727
30	1.1270	1.3912
40	1.1765	1.4085
50	1.2296	1.4243
60	1.2856	1.4385

的密度变化。如图 8(b) 所示, 频移变化量与密度变化量呈线性关系, 计算可得灵敏度  $S = 97.6 \text{ GHz}/(\text{kg}/\text{m}^3)$  (306.49 GHz/RIU)。通过上述分析可以验证所设计的超表面器件能够实现不同密度蔗糖溶液的传感检测, 并且具有良好的传感性能, 从而证明了该器件在生物分子传感领域具有极高的使用价值。基于相同的原理, 可以将传感应用推广至生物检测领域, 例如肿瘤细胞检测、血红蛋白检测等。



群速度； $D$  为超表面的厚度。在太赫兹传播过程中, 传播系数与角频率之间不存在线性关系。电磁波的相速度随着频率的变化而变化, 这会导致频谱色散。同时, 两个明模结构之间的近场耦合会导致强烈的色散和相位突变, 从而使得群折射率产生变化。如图 9 所示, 透明窗口的群时延为 3.03 ps。经过计算, 该频率处的群折射率为 174.8, 这意味着当太赫兹波通过超表面时速度降低为原来的 1/174.8。上述分析表明所设计的器件可以应用在慢光器件中, 并且具有良好的性能。

从图 9 中可以观察到群时延出现了负值, 这是由异常色散造成的。负群时延可以用来描述信号

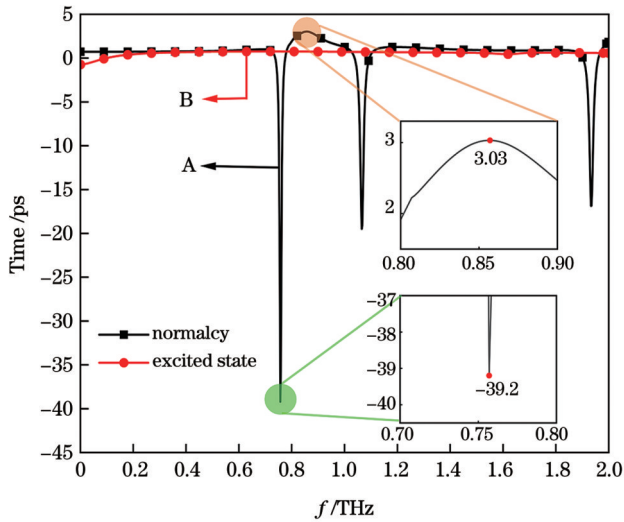


图 9 不同工作状态的群时延曲线

Fig. 9 Group delay curves for different working states

传输过程中的相位情况,一个传输系统性能的优劣主要由频率特性和时域特性来判断。负群时延可以用于评估一个系统的相频一致性。在天线系统中使用负群时延结构,可以有效增加带宽、减小波束偏斜。

对于大多数具有慢光效应的超表面器件,其功能都无法自主选择,从而造成了其应用的局限性。笔者在设计中引入了光敏硅、二氧化钒,目的是实现功能的可控性。如图 9 所示,A 曲线是材料未被激发时的群时延曲线,此时器件表现为正常的慢光器件,可以实现对电磁波传播速度的调控。当两种材料被激发时,群时延曲线表现为 B 曲线,此时慢光效应消失,电磁波以正常的速度通过超表面结构。其主要原因在于:当光敏材料被激发时,透明窗口的相变发生了变化,当处于激发态群时延无限接近于 0 时,可认为慢光效应消失,从而实现了慢光器件的可选择性。

### 3.3 基于可调控材料实现可控双通道温光双控开关

前文分析 EIT 作用机理时得出了 EIT 主要由十字结构和方环结构之间的相消干涉形成这一结论,因此,在设计超表面结构时可以考虑通过可调控材料的可调特性分别影响两种结构的谐振,以得到不同的响应。十字结构两端沉积光敏硅,方环结构内部补充二氧化钒。结果如图 10 所示,当光敏硅被激发时,前波谷处的幅值由 0.025 增至 0.923,开关 A 实现了由关闭到打开的转换,而开关 B 则仍处于关闭状态。经过计算得到开关 A 的有效工作带宽为 61.46 GHz。当二氧化钒被激发时,后波谷处的幅值由 0.044 增至 0.915,开关 B 启动,A 开关则处于关闭状态,B 开关的有效工作带宽为 70.7 GHz。通过不同材料的调控,成功实现了一个双通道的温光双控开关。通过控制两种材料的激发与否来选择开启不同的开关,就可以控制电磁波的传输与否。经过分析,实

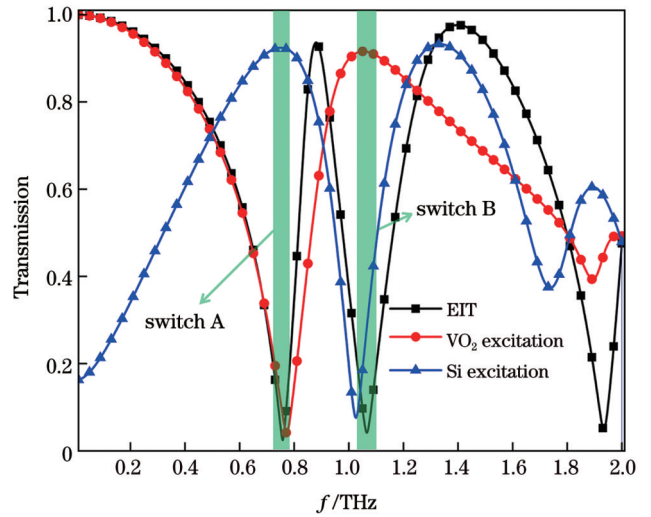


图 10 不同材料激发态的传输曲线

Fig. 10 Transfer curves of excited state of different materials

现双通道开关的关键在于破坏原有的电磁响应。本文提出的利用可调控材料改变结构响应的设计方法对于后续的超表面器件设计具有借鉴和参考意义。

由于所设计的超表面结构为周期阵列,当光敏硅被激发时,十字结构被连接,其原有的谐振被破坏,谐振峰消失,与方环结构的间接耦合变弱,又由于十字结构谐振频率位于 EIT 响应曲线的左侧,所以传输曲线表现为前波谷幅值增大。当二氧化钒被激发时,方环结构被补充成方块结构,结构改变导致谐振位置发生了变化,方环与十字结构的间接耦合减弱,因此传输曲线表现为后波谷幅值增大。

为了进一步解释双通道开关的作用机理,笔者对不同状态下的电场分布进行了分析计算。开关 A 未打开时的电场分布如图 11(a) 所示,电偶极子集中分布在十字结构两端。开关 A 打开后,结果如图 11(b) 所示,电磁响应消失。这主要是因为,当光敏硅被激发时,周期阵列之间的十字结构被接通,谐振响应红移,因此原有的工作频率响应消失,进而导致电场分布消失。开关 B 未打开时的电场分布如图 11(c) 所示,电偶极子主要分布在方环开口处。开关 B 打开后,如图 11(d) 所示,电场分布消失。这主要是因为,当二氧化钒被激发时,单元方块结构等价于方块结构,谐振频率蓝移。

## 4 结 论

笔者提出了一种可以实现分子传感、可控慢光以及双通道光控开关的多功能偏振无关超表面结构。该超表面的基础结构为 1 个十字结构和 4 个方环结构。为了实现功能多样和功能可控,在该结构中引入了光敏硅与二氧化钒。通过电场分析和理论模型阐述了 EIT 现象的形成机理:由基础结构作为明模

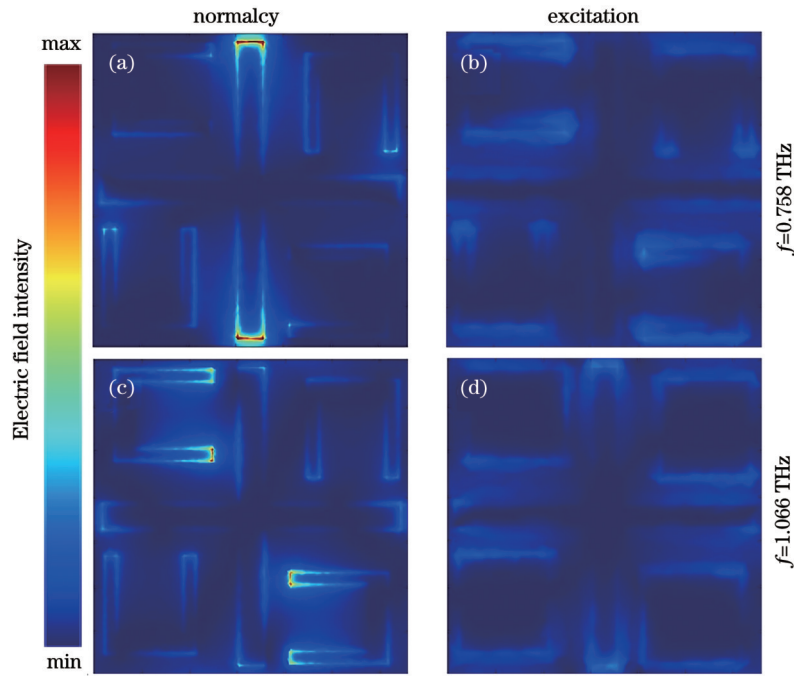


图 11 不同工作状态下的电场分布。(a)常态下 0.758 THz 处的电场分布;(b)硅激发态下 0.758 THz 处的电场分布;(c)常态下 1.066 THz 处的电场分布;(d)二氧化钒激发态下 1.066 THz 处的电场分布

Fig. 11 Electric field distributions under different working conditions. (a) Electric field distribution at 0.758 THz under normal condition; (b) electric field distribution at 0.758 THz in Si excited state; (c) electric field distribution at 1.066 THz under normal condition; (d) electric field distribution at 1.066 THz in  $\text{VO}_2$  excited state

发生间接耦合形成 EIT。在传感应用方面,用该结构对不同密度的蔗糖溶液进行了传感检测,检测灵敏度为  $97.6 \text{ GHz}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,验证了本设计在分子检测领域的应用潜力。讨论了超表面的慢光效应,其在透明窗口处的群时延为 3.03 ps,群折射率为 174.8,并且该超表面能够通过可调控材料实现慢光效应的可选择性,弥补了以往慢光器件无法关闭的缺陷。最后,基于可调控材料实现了可控的双通道开关,带宽分别为 61.46 GHz 和 70.7 GHz,为 EIT 超表面的实现提供了新的设计思路,即破坏原有结构谐振来获得新的电磁响应,这为未来的研究提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Li J X, Yu P, Tang C C, et al. Bidirectional perfect absorber using free substrate plasmonic metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(12): 1700152.
- [2] 杨朝晖,江明珠,刘永琛,等.基于二氧化钒复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器[J].*中国激光*, 2021, 48(17): 1714001.  
Yang Z H, Jiang M Z, Liu Y C, et al. Tunable-bandwidth terahertz polarization converter based on a vanadium dioxide hybrid metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1714001.
- [3] Zhang X J, Wang Y, Cui Z J, et al. All-silicon periodic and non-periodic THz metasurface for sensing applications[J]. *Optical Materials*, 2022, 126: 112206.
- [4] 袁婷婷,吴靖文,薄艳华,等.基于太赫兹超表面传感器的硝基咪唑类药物痕量检测[J].*光学学报*, 2023, 43(7): 0717001.  
Yuan T T, Wu J W, Bo Y H, et al. Trace detection of nitrofurantoin drugs based on terahertz meta-surface sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0717001.
- [5] Gasimov N, Karaaslan M, Sabah C, et al. Some aspects of mass-energy equivalence which appears in left-handed metamaterials[J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2019, 6: 16.
- [6] Fu T, Liu F, An Y B, et al. Separately tuning of double Fano resonances in facile asymmetric slit metasurface[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(5): 052009.
- [7] Eisaman M D, André A, Massou F, et al. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses[J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 837-841.
- [8] Yahiaoui R, Burrow J A, Mekonen S M, et al. Electromagnetically induced transparency control in terahertz metasurfaces based on bright-bright mode coupling[J]. *Physical Review B*, 2018, 97(15): 155403.
- [9] Han L, Tan Q L, Gan Y, et al. Polarization-insensitive classical electromagnetically induced transparency metamaterial with large group delay by Dirac semimetal[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103377.
- [10] Wang Q A, Kuang K L, Gao H X, et al. Electromagnetically induced transparency-like effect by dark-dark mode coupling[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5): 1350.
- [11] Liu M, Tian Z, Zhang X Q, et al. Tailoring the plasmon-induced transparency resonances in terahertz metamaterials[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19844-19855.
- [12] Bhattacharya A, Sarkar R, Sharma N K, et al. Multiband transparency effect induced by toroidal excitation in a strongly coupled planar terahertz metamaterial[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 19186.
- [13] 华沁怡,陈心豪,吕俊鹏,等.反射型太赫兹超表面电磁诱导透明效应[J].*中国激光*, 2021, 48(12): 1214002.  
Hua Q Y, Chen X H, Lü J P, et al. Reflection-type electromagnetically induced transparency effect in terahertz metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1214002.
- [14] Zhang J, Mu N, Liu L H, et al. Highly sensitive detection of malignant glioma cells using metamaterial-inspired THz biosensor based on electromagnetically induced transparency[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2021, 185: 113241.



- [15] Zhu L, Zhao X, Dong L, et al. Polarization-independent and angle-insensitive electromagnetically induced transparent (EIT) metamaterial based on bi-air-hole dielectric resonators[J]. RSC Advances, 2018, 8(48): 27342-27348.
- [16] 杨森, 王佳云, 张婷, 等. 温度电压双可控宽带太赫兹极化转换/吸收超表面[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0824001.  
Yang S, Wang J Y, Zhang T, et al. Temperature-voltage bi-controllable broadband terahertz polarization conversion/absorption metasurface[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0824001.
- [17] Wang X Y, Chen C, Gao P, et al. Slow-light and sensing performance analysis based on plasmon-induced transparency in terahertz graphene metasurface[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 4794-4801.
- [18] Cheng Y Z, Liu J Q, Chen F, et al. Optically switchable broadband metasurface absorber based on square ring shaped photoconductive silicon for terahertz waves[J]. Physics Letters A, 2021, 402: 127345.
- [19] Li J S, Li X J. Switchable tri-function terahertz metasurface based on polarization vanadium dioxide and photosensitive silicon[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12823-12834.
- [20] Zhu Q H, Shi S Y, Wang J J, et al. Linear optical switch metasurface composed of cross-shaped nano-block and  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [J]. Optics Communications, 2021, 498: 127222.
- [21] 戴耀威, 陈聪, 高鹏, 等. 基于空间编码结构光源的 2 bit 光控可编程太赫兹超表面[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1124004.  
Dai Y W, Chen C, Gao P, et al. 2 bit optically controlled programmable terahertz metasurface based on spatially encoded structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1124004.
- [22] 汪静丽, 董先超, 尹亮, 等. 基于二氧化钒的太赫兹双频多功能编码超表面[J]. 物理学报, 2023, 72(9): 098101.  
Wang J L, Dong X C, Yin L, et al. Vanadium dioxide based terahertz dual-frequency multi-function coding metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(9): 098101.
- [23] Kou W, Shi W Q, Zhang Y X, et al. Terahertz switchable focusing planar lens with a nanoscale vanadium dioxide integrated metasurface[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(1): 13-22.
- [24] Shen X P, Cui T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber[J]. Journal of Optics, 2012, 14(11): 114012.
- [25] Shen N H, Massaoui M, Gokkavas M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(3): 037403.
- [26] Lu X G, Dong B W, Zhu H F, et al. Two-channel  $\text{VO}_2$  memory meta-device for terahertz waves[J]. Nanomaterials, 2021, 11(12): 3409.
- [27] Cheng Y Z, Gong R Z, Zhao J C. A photoexcited switchable perfect metamaterial absorber/reflector with polarization-independent and wide-angle for terahertz waves[J]. Optical Materials, 2016, 62: 28-33.
- [28] Zhang J Y, Yan H B, Yang X Q, et al. Dual-function metasurface for tunable selective absorption[J]. Micromachines, 2022, 13(12): 2087.
- [29] Fan F, Hou Y, Jiang Z W, et al. Terahertz modulator based on insulator-metal transition in photonic crystal waveguide[J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4589-4596.
- [30] Yang Y, Long S W, Sun G Y, et al. Epitaxial growth and thermochromic properties of B-phase  $\text{VO}_2$  thin films on  $\text{SrTiO}_3$  substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(10): 100303.
- [31] 王梓鑫, 董宁宁, 王路路, 等. 飞秒激光诱导二氧化钒光学特性转变(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10): 1014007.  
Wang Z X, Dong N N, Wang L L, et al. Femtosecond laser induced optical property transformation of vanadium dioxide (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10): 1014007.
- [32] Chen J, Kuang Y H, Gu P, et al. Strong magnetic plasmon resonance in a simple metasurface for high-quality sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4525-4528.
- [33] 向倩, 丁益民, 李政, 等. 基于滴定法探究溶液浓度与折射率的关系[J]. 大学物理实验, 2023, 36(1): 23-28.  
Xiang Q, Ding Y M, Li Z, et al. Probe into the relationship between solution concentration and refractive index based on titration[J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(1): 23-28.
- [34] Vafapour Z. Large group delay in a microwave metamaterial analog of electromagnetically induced reflectance[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2018, 35(3): 417-422.

## Dual-Control Multifunctional Metasurfaces Based on Electromagnetic Induced Transparency

Liu Hai\*, Zhao Jiaming, Chen Cong, Gao Peng, Dai Yaowei, Lu Xiangyu, Wan Yinhui, Wang Xinyan, Zhao Siyi

School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** The phenomenon of electromagnetically induced transparency (EIT) was first discovered in atomic systems with three-level distributions. It is a destructive interference phenomenon between strongly coupled light beams in different transmission paths, which makes initially opaque media transparent. However, the implementation of EIT in atomic systems requires extremely strict external conditions, such as ultralow temperatures and intense pumping light, which limit its practical application and development. In recent years, with vigorous research on metasurfaces, the EIT phenomenon has overcome traditional limitations and can be achieved via the coupling of the bright or dark modes of metasurfaces, thereby expanding its applications in molecular sensing, slow-light devices, and other fields. However, a large portion of the research on EIT metasurfaces selects nonadjustable metal structures in their

design, which implies that the designed functionalities are limited to the characteristics of EIT. This considerably restricts the applicable scenarios and hinders further development of this research. This paper introduces adjustable materials into the design of EIT metasurfaces and proposes a multifunctional and polarization-independent metasurface based on EIT. By integrating multiple functions into a single structure, it achieves sensing and measurement of sucrose solvents, controllable slow-light effects, and a temperature-and-light dual-control switch. This significantly enhances the functionality of EIT metasurface devices and demonstrates the design concept of using adjustable materials to change the structural resonance and control the electromagnetic response, thereby providing valuable references for EIT metasurface research.

**Methods** In this study, the EIT phenomenon was mainly achieved by coupling the bright modes. The bright-mode structure can couple with electromagnetic waves in a dipole resonance state with a low-quality factor. The primary metal square ring and cross structures were used as two modes that indirectly couple to form a transparency window, and the relevant mechanism is further explained by introducing the Lorentz resonance model. To expand the application functionality of EIT metasurfaces, we deposited photosensitive silicon on both ends of the cross-structure, which was excited by an 800 nm near-infrared laser pulse. Vanadium dioxide was embedded inside the square ring structure, which underwent a nonmetal to metal phase transition at 68 °C. Using these two control methods, temperature and light, controllable slow-light effects, and dual-control dual-channel switches were achieved.

**Results and Discussions** The period of the metasurface structure designed in this study is illustrated in Fig. 1. When the two materials are in an unexcited state, the metasurface response exhibits an EIT phenomenon. We discuss the corresponding sensing characteristics when the ambient refractive index changes with a sensitivity of 306.49 GHz/RIU. To validate the potential application of this design in the field of molecular sensing, we introduced relevant data for sucrose molecules and achieved sensing measurements for sucrose molecules with a sensitivity of 97.6 GHz/(kg/m<sup>3</sup>). This also implies that the design can be extended to other molecular sensing and detection fields, such as tumor cells and hemoglobin. Regarding the slow-light effect, the group delay at the transparency window was 3.03 ps, and the group refractive index was 174.8. When both materials are in the excited state, the slow-light effect disappears, implying that the slow-light effect can be activated by controlling the excitation of the materials. For the temperature-light dual-control switch, when the photosensitive silicon is excited, the cross structure is connected, causing the original resonance of the cross structure to be destroyed and the resonance peak to disappear. The indirect coupling between the cross and square-ring structures weakens. Because the resonance frequency of the cross structure is located on the left side of the EIT response curve, it increases the amplitude of the front dip of the transmission curve. However, when vanadium dioxide is excited, the square ring structure is supplemented with a square structure, causing a change in the resonance position owing to structural alterations. The indirect coupling between the square-ring structure and cross structure is weakened, thus increasing the amplitude of the rear dip.

**Conclusions** This paper proposes a versatile, polarization-independent metasurface structure that enables molecular sensing, controllable slow light, and dual-channel light-controlled switching. The basic structure of the metasurface is composed of a cross structure and four square ring structures. Photosensitive silicon and vanadium dioxide are introduced to achieve diverse and controllable functions. The formation mechanism of the EIT phenomenon is explained based on electric-field analysis and theoretical models, where the basic structures act as bright modes and undergo indirect coupling. Sensing measurements of sucrose solutions of different concentrations validate the potential of this design in the field of molecular detection. The slow-light effect of the metasurface is discussed, and its selectivity of the slow light effect is achieved using controllable materials, addressing the limitations of previous slow-light devices that cannot be turned off. Lastly, a controllable dual-channel switch based on controllable materials is realized, with bandwidths of 61.46 and 70.7 GHz, respectively. This provides a new design approach for EIT metasurfaces that disrupts the resonance of the original structure to obtain new electromagnetic responses, offering a reference for future research.

**Key words** optics at surfaces; metasurface; adjustable material; molecular sensing; slow-light effect; temperature and light dual-control switch