

doi:10.3788/gzxb20184711.1116001

基于全介质超表面的电磁诱导透明研究

胡森¹, 刘丹¹, 杨河林²

(1 湖北第二师范学院 物理与机电工程学院, 武汉 430205)

(2 华中师范大学 物理科学与技术学院, 武汉 430079)

摘要:设计了一种基于 TiO₂ 介质的全介质电磁诱导透明超表面模型, 该结构由两根十字垂直交叉的介质棒和四个介质方块组成. 在入射电磁场的作用下, 介质棒中直接被入射电磁场激励的米氏电谐振通过相互耦合作用激发了介质方块中的磁共振, 并产生谐振模之间的相消干涉, 从而产生了类电磁诱导透明现象. 利用电磁仿真软件和双谐振子耦合模理论, 模拟计算和定量分析了类电磁诱导透明效应, 结果表明: 在电磁波正入射下, 该结构在 0.552 THz 处产生一透射率接近 96% 的透明窗口. 由于其结构单元具有 4 度旋转对称性和多个暗模谐振元素, 使得诱导透明效应出现较宽频带且呈现出对入射电场极化方向不敏感的特性.

关键词:超表面; 电磁诱导透明; 仿真; 全介质; 米共振; 极化不敏感

中图分类号: O441.6; O451; O431.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2018)11-1116001-9

Electromagnetic Induced Transparency Based on All-dielectric Metasurface

HU Sen¹, LIU Dan¹, YANG He-lin²

(1 Department of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan, 430205, China)

(2 College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan, 430079, China)

Abstract: Classical analogy of electromagnetically induced transparency-like effect was demonstrated by a all-dielectric metasurface structure based on TiO₂, which composed of two cross perpendicular dielectric bars and four dielectric bricks. Under the excitation of incident electromagnetic field, electric Mie resonance, which is directly excited by the incident electromagnetic field in the dielectric bar, can excite the magnetic Mie resonance in the dielectric bricks by the interaction of each other, and then produce the destructive interference between the resonant modes, thus the phenomenon of electromagnetic induced transparency occurs. By using the simulation software and the "two oscillators" coupled model, the simulation calculation and quantitative analysis of the electromagnetic induced transparency effect were both carried out. Results show that a transparent window with a transmittance of nearly 96% is generated at 0.552 THz under the normal incidence of electromagnetic wave. Owing to its C4 rotation symmetric and multiple dark mode resonant elements of the proposed structure, the induced transparency effect is characterized by a broadband transparency window and insensitive to the incident electric field polarization.

Key words: Metasurface; Electromagnetic induced transparency; Simulation; All-dielectric; Mie resonance; Polarization insensitive

OCIS Codes: 160.3918; 160.4760; 160.2100 ; 160.1245

基金项目: 国家自然科学基金(No.11504100)资助

第一作者: 胡森(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电磁超材料及应用. Email: husen8209@126.com

通讯作者: 刘丹(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体、超材料理论及应用. Email: liudanhu725@126.com

收稿日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-08-20

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)源自于光场与介质原子系统相互作用过程中发生的量子干涉效应,当电磁波穿过介质时具有低损耗、高透明度、强色散等传播特性^[1-3].由于在慢光器件、传感器、偏振控制以及增强非线性效应等方面具有潜在的应用前景,EIT受到科研人员广泛关注^[4-6].但是,科研人员在利用原子系统进行EIT技术相关研究和应用时会面临到一些困难或局限,如极低温的实验条件、高强度的激光、适宜的原子能级系统等^[4,7].

近年来随着超材料研究的不断深入,利用电磁超材料(Metamaterial, MM)模拟产生类EIT效应,既具有类似于EIT原子系统的电磁特性,同时又不受原子系统极低温、高强度激光等实验条件的限制,因此在电磁场技术领域备受关注^[8-10].类EIT超材料结构通常包含两种谐振单元:一种是能直接与入射电磁场相耦合的高辐射谐振单元,称为“明模”(Bright mode),这种谐振结构由于辐射损耗较大,一般具备较低的品质因数(Q factor);另一种是不能直接被入射电磁场激发但可以通过“明模”诱导而产生耦合的非辐射谐振单元,称为“暗模”(Dark mode),由于暗模与自由空间耦合作用很弱,辐射损耗低,因此Q值较大.当电磁波分别照射到明暗模谐振单元结构时,它们都表现为对电磁波的阻滞,并且它们形成的阻带有相同或者比较接近的中心频率.而将明暗模结构组合成单元结构,在电磁波照射下,高辐射的“明模”与低辐射的“暗模”间发生相互耦合激发电磁能量传输到“暗模”,使得电磁场产生相消干涉,于是在阻带的中心频率处产生一个锐利的透明窗口^[8,10-12].在EIT产生的过程中,由于暗模式参与耦合,抑制了材料的辐射损耗,因此获得的透射谱线通常具有较高的Q值.

利用典型的谐振结构金属开口环(Split Ring Resonator, SRR)、金属短线(Cut Wire, CW)的电磁谐振、LC谐振等^[13-15]EIT结构多采用金属材料.近年来,基于全介质的类EIT超材料研究逐渐兴起,在较高频率范围(如THz波段等)内,相较于传统的贵金属材料而言,介质材料的介电常数高且没有非辐射损耗(如欧姆损耗).并且,在外场作用下介质材料中形成的米氏(电/磁)共振(Mie resonance)可以替代金属材料中的谐振来构建具有低吸收损耗的结构,为实现较高频率范围的类EIT效应提供了一种更为简单和有效的方法^[16-17].Miroshnichenko A E等^[17]证明了全介质低聚物的光场散射能产生对散射截面有强抑制作用的Fano共振现象,其共振源于光诱导高介电常数纳米颗粒的磁偶极模式且对结构的变化不敏感.Zhang等^[19]设计了由两个哑铃形介质谐振器组成的风车状一体化超材料结构,利用介质Mie电磁谐振间的耦合,产生了对电场极化角入射角不敏感类EIT效应.Zhu等^[20]同样利用Mie电磁共振的耦合,设计了一种包含多个暗模谐振结构的全介质EIT超材料结构,拓展了狭窄的透明窗口的频带.

本文设计了一种基于TiO₂介质的全介质超表面模型,该模型在引入多个暗模谐振元素的同时在结构设计上还呈现出C₄旋转对称性,既实现了太赫兹波段类EIT透明窗口的展宽,同时还呈现出对入射波极化不敏感的特性.通过表面电磁场分布的定量分析,得出此EIT效应的产生机理是入射电磁场的作用下Mie电共振耦合激发的Mie磁共振间的相消干涉.此外,基于双谐振子耦合模理论,对其产生机理还进行了定量分析.本论文的研究方法和结论对全介质类EIT超表面模型设计、性能研究以及非线性光学等方面的应用有一定的借鉴意义.

1 模型与仿真

全介质EIT超表面模型如图1.该模型为平面周期性构造(见图1(a)),由两根长度相同、相互垂直的介质棒(dielectric bar)和四个大小一致的介质方块(dielectric brick)构成的单元结构(见图1(b))覆着在石英(quartz)基底(相对介电常数 $\epsilon_{\text{quartz}} = 3.75 + i0.0004$)上.整个结构呈现出C₄旋转对称性,即旋转90°后与原结构完全重合.介质层的材料为TiO₂,其相对介电常数 $\epsilon_{\text{TiO}_2} = 114$,介质损耗正切 $\tan\delta_{\text{TiO}_2} = 0.01$ ^[20].图1(b)中介质棒的长 $b = 220 \mu\text{m}$,宽 $s = 20 \mu\text{m}$;介质方块表面为正方形,边长 $a = 55 \mu\text{m}$;所有的介质层厚度均为 $t = 20 \mu\text{m}$.石英基底厚度 $w = 100 \mu\text{m}$,单元结构在 x 轴和 y 轴方向设置为周期性边界,周期尺寸 $P_x = P_y = 240 \mu\text{m}$.EIT超表面的电磁特性采用三维电磁场仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)进行全波仿真分析,如图1所示,平面电磁波沿 z 轴垂直于单元结构入射,电场沿 y 方向线极化,磁场则沿 x 轴.

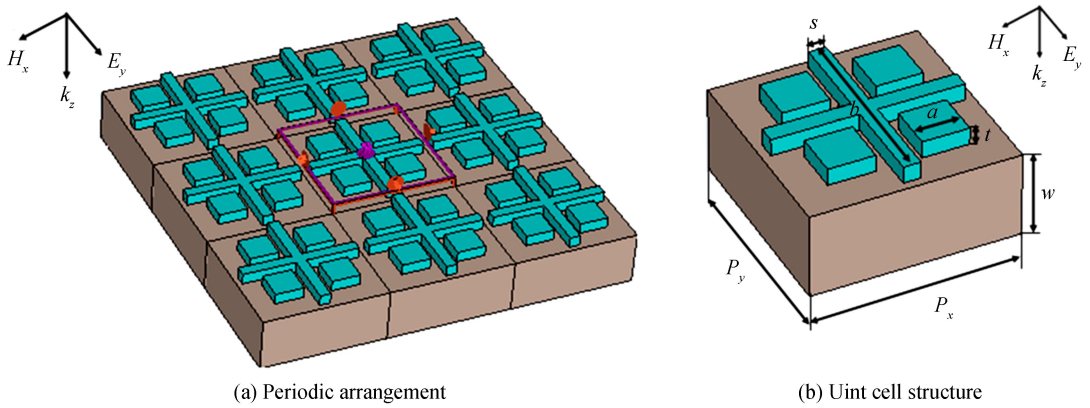


图1 全介质 EIT 超表面结构示意图
Fig.1 Schematic view of all dielectric EIT metasurface structure

保持基底板材及尺寸与总结构相同,分析单根介质棒和单个介质方块在不同极化电磁场激励下的透射特性.电磁场垂直入射到单根介质棒上,当电场极化方向沿 y 轴(棒长方向)时,可以看到入射电磁波在 0.568 THz 处出现了明显的共振吸收,如图 2(a)所示.从介质棒表面电场的分布情况(见图 2(a)插图)来看,棒中产生了沿竖直方向的电场.究其原因,是由于在外加电场作用下介质棒中产生了电极化,在棒长方向产生的位移电流振荡引起了米氏共振(Mie resonance)^[19].当电磁场从介质方块侧面入射,电场仍沿 y 轴极化而磁场沿 z 轴(垂直于介质方块)方向时,介质方块中的米氏共振吸收产生于 0.547 THz 频点处,如图 2(b)所示,而此频点处介质方块表面出现环形电场分布,这是由磁场激励而产生的环形位移电流形成的米氏共振^[19].相较于介质棒中的米氏共振,磁场激励的共振吸收曲线更为尖锐, Q 值更大.两者具有比较接近的谐振频率和差异较大的 Q 值,满足构成类 EIT 超材料的条件^[8].在构造的 EIT 超表面结构(如图 1)中,介质棒被视为“明模”,它直接受外加电场激励;作为“暗模”介质方块不能直接受到外加磁场激励,而只能通过与介质棒之间的耦合被激发.

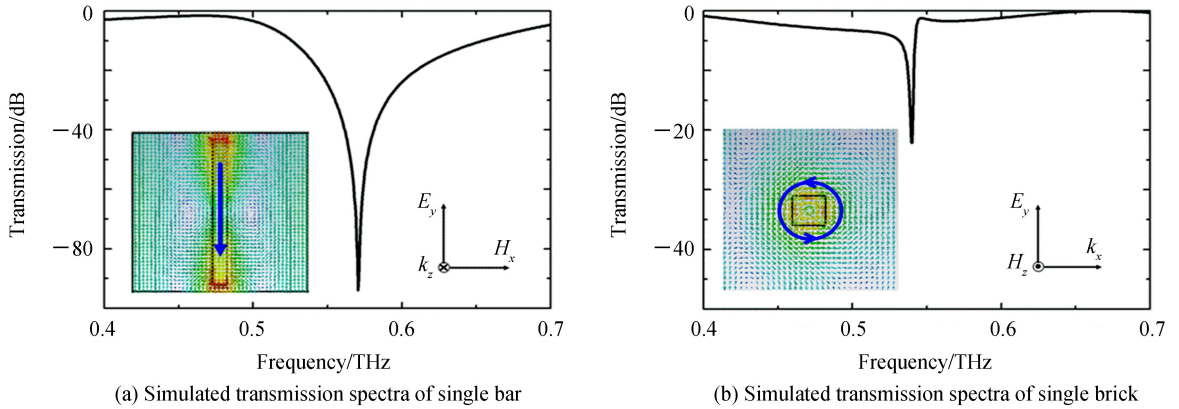


图2 单根介质棒和介质方块在不同极化电磁场激励下的仿真透射谱,插图为它们在各自谐振频点处表面电场分布
Fig.2 Simulated transmission spectra of single dielectric bar and single dielectric brick, and the insets show the electric field distributions at their respective resonant frequencies

将两者组合起来构造成如图 1 所示的 EIT 结构单元,仿真计算其透射特性.如图 3(a)所示,可以看到对应的频带范围内出现了典型的 EIT 透射现象,在 0.507 THz 和 0.603 THz 两个透射谷之间出现了一透射值接近 96%的透射峰(位于 0.552 THz).从图 3(b)所示的透明峰值频点处介质结构表面电场分布来看,“暗模”介质方块中位移电流形成的环形电场更为明显,“明模”介质棒中的谐振被抑制.这说明,通过明暗模之间的相互耦合作用,作为“明模”的介质棒激发了“暗模”中的共振,同时介质棒的共振显著地受到了抑制.可以清楚地看到,单元结构的左侧两个介质方块表面所形成的环形电场的环绕方向是逆时针,而右侧两个则为顺时针绕向,这样一来四个介质方块中的环形电场之间产生了相消干涉,导致 EIT 超表面对入射电磁场的吸收被抑制,从而形成了高透射的透明峰.另外值得注意的是,不同于一般超材料结构的尖锐窄带类 EIT 透射特

性,该 EIT 透射谱的透射峰较宽,同时由于单元结构的 C4 对称性,还呈现出了对入射场极化不敏感的特性,这些特性在接下来的分析中逐一讨论.

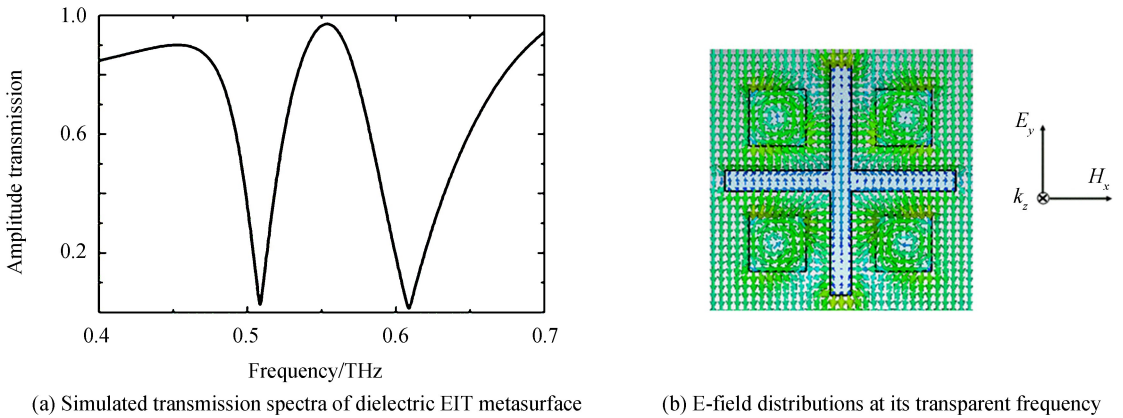


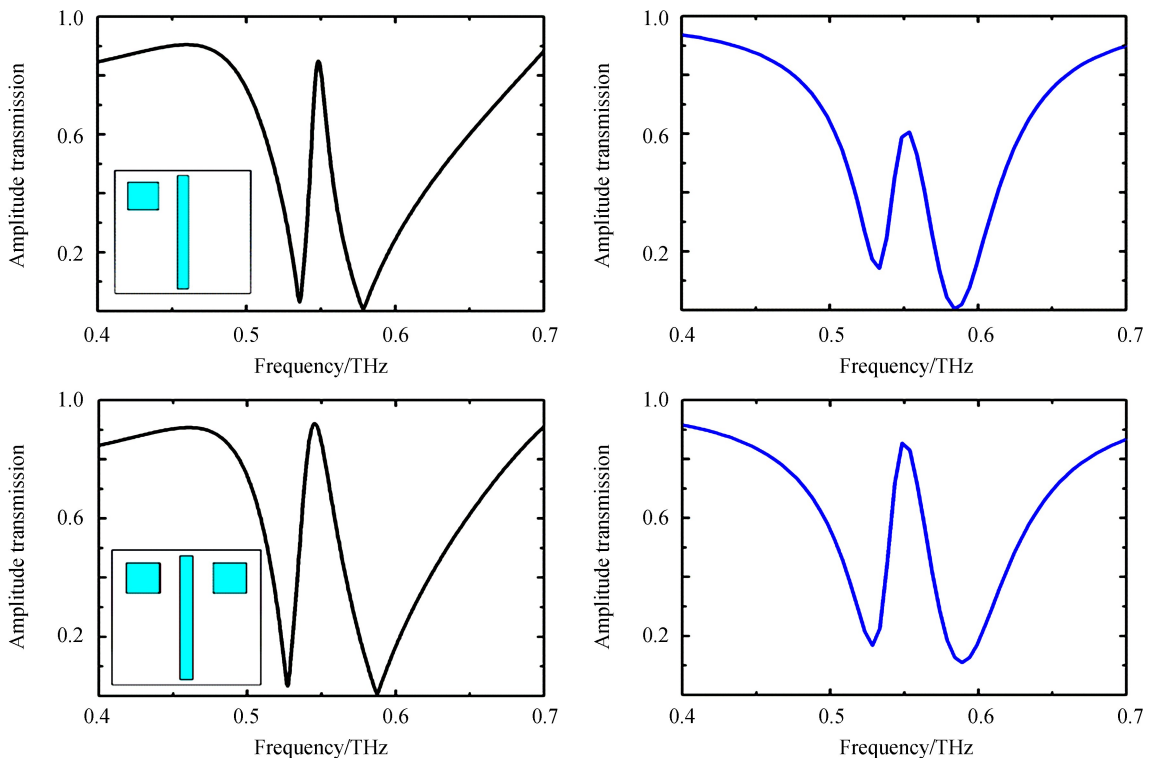
图3 全介质 EIT 超表面的仿真透射谱及 EIT 透明窗口频点(0.552 THz)处超表面结构表面电场分布

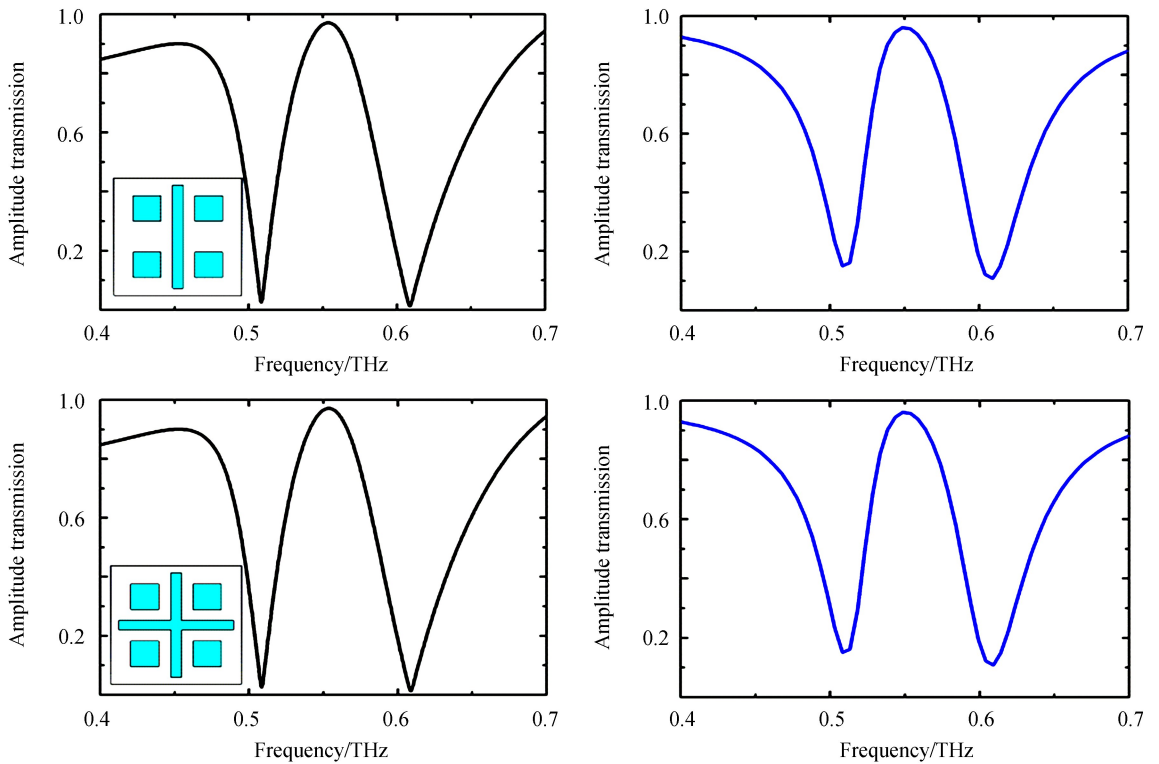
Fig.3 Simulated transmission spectra of the dielectric EIT metasurface and the electric field distributions at the frequency (0.552 THz) of its transparent window

2 分析与讨论

2.1 类 EIT 效应的产生

基于同样的介质棒和方块构建另外三种不同的单元结构,分别为单根介质棒和一个、两个、四个介质方块所组成的 EIT 结构(见图 4(a)插图),可以很清楚地看到,随着“暗模”(介质方块)数量的不断增多,透射曲线显示的透射峰所在的频点几乎没发生改变,而透明窗口则从最初的尖锐窄带变化到较宽的透射情形.这说明,增加 EIT 结构中“暗模”(谐振元素)的数量能使得明暗模之间的耦合强度增加,从而能有效拓宽狭窄的透明窗口,这与之前文献报道的研究结论是一致的^[20].而图 4(a)中后两种结构的透射谱是完全相同的,对比两种 EIT 结构发现两者中均含 4 个介质方块,即“暗模”的数量是相同的,而在入射电磁场(电场极化方向沿 y 轴)的作用下,介质方块中央十字垂直交叉放置的两根介质棒中只有沿 y 轴放置的介质棒受外场激励,与单根介质棒的情形是相同的.



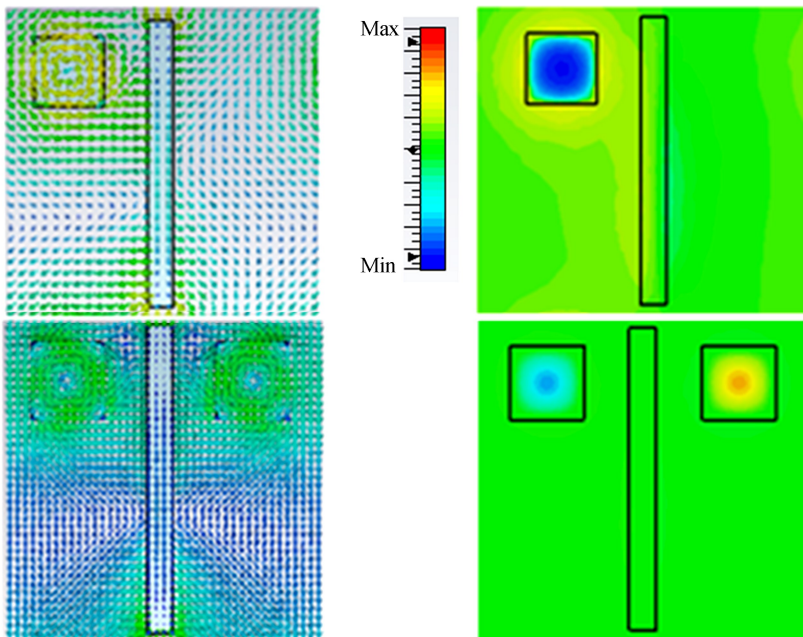


(a) Simulated transmission spectra of four different EIT structures (b) Corresponding analytically calculated transmission spectra

图4 四种不同的 EIT 超表面结构的仿真透射曲线和相应的耦合模理论解析曲线

Fig.4 Simulated transmission spectra and the corresponding analytically calculated transmission spectra of four different dielectric EIT structures

图 5 给出了对应的四种不同 EIT 结构的表面电场和磁场分量 H_z 分布来详细说明上述现象的产生机理.从图 5(a) 所示的单个介质方块的表面电场分布可以看出,该介质方块在外加电场以及它与“明模”介质棒之间相互耦合磁场的共同作用下,方块中产生了显著的环形电场,同时介质棒中的电场分布则相对显得较为微弱.当 2 个和 4 个介质方块对称地分布于介质棒两侧时,两侧的介质方块均与介质棒相互耦合,使得介质方块中产生产生 Mie 磁共振而形成了环形电场,并且两侧环形电场的绕行方向相反,对应的磁场分量 H_z 的分布同样显示出这一特性.这样一来,“明模”介质棒中的谐振受到更为强烈的抑制,透明窗口对应峰值和带宽因此也得以增加.



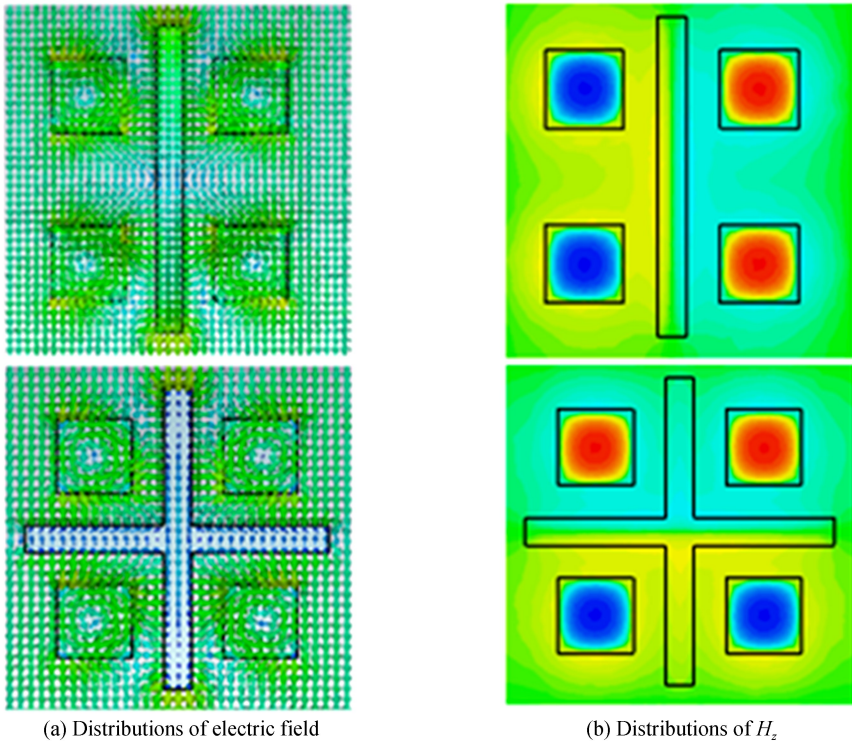


图5 四种不同的 EIT 超表面结构的表面电场和相应的磁场分量 H_z 的分布

Fig.5 Distributions of electric field and the corresponding H_z of four different dielectric EIT structures

2.2 “双谐振子”耦合模理论分析

除了以上利用表面电场和磁场分布对 EIT 效应进行定性分析之外,经典的“双谐振子”耦合模型也常被用于定量地解释 EIT 现象.通常,将类 EIT 超表面结构中的“明模”和“暗模”分别类比于受外场和不受外场激励的谐振子,它们分别满足方程^[22-24]

$$\ddot{x}_1(t) + \gamma_1 \dot{x}_1(t) + \omega_0^2 x_1(t) + \Omega^2 x_2(t) = g E_0(t) \quad (1)$$

$$\ddot{x}_2(t) + \gamma_2 \dot{x}_2(t) + (\omega_0 + \delta)^2 x_2(t) + \Omega^2 x_1(t) = 0 \quad (2)$$

式中, ω_0 为“明模”谐振子在外场 $E_0(t)$ ($E_0(t) = E_0 e^{i\omega t}$) 激励的本征振荡频率; δ 为“暗模”谐振子与“明模”谐振子本征振荡频率间的失谐因子; Ω 为明暗模谐振子间的耦合强度; γ_1 和 γ_2 分别描述它们各自的阻尼常数; g 为外场与明模谐振子间的耦合强度.令 $x_1(t) = x_1 e^{i\omega t}$, $x_2(t) = x_2 e^{i\omega t}$, 并同时利用近似关系 $\omega_0^2 - \omega^2 \approx -2\omega_0(\omega - \omega_0)$, 可以计算出该耦合谐振子系统的透射参数为

$$T = 1 - \text{Re} \left[\frac{ig^2(\omega - \omega_0 - \delta + i\gamma_2/2)}{(\omega - \omega_0 + i\gamma_1/2)(\omega - \omega_0 - \delta + i\gamma_2/2) - \Omega^2/4} \right] \quad (3)$$

式(3)的第二项表示系统的散射系数,采用 $T = 1 - R$ 的近似计算^[23].用 Matlab 软件对以上四种不同 EIT 结构的透射参数进行数据拟合,确定了与仿真透射曲线最为吻合的四条曲线作为耦合模理论解析结果(图 4 (b)).同时,耦合得到的各参数值如表 1.

表 1 所有 EIT 结构的耦合参数(单位:THz)

Table 1 The fitting parameters for all EIT structures (unit: THz)

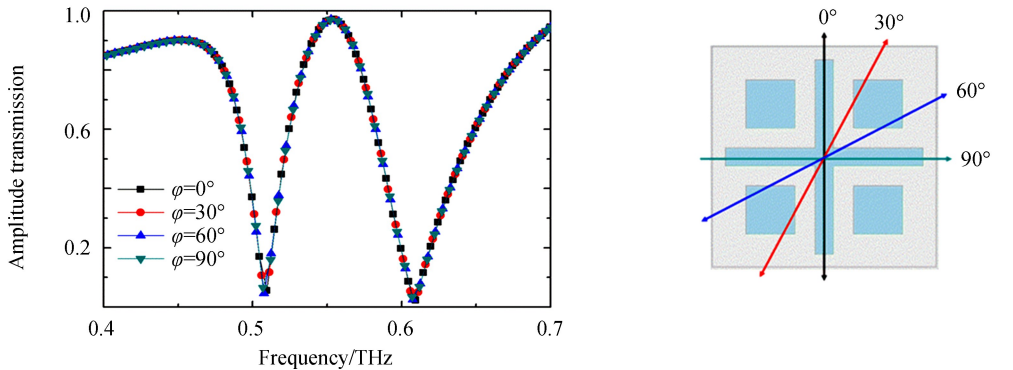
EIT structures	γ_1	γ_2	Ω	g
Bar and one brick	0.103	0.007	0.054	0.197
Bar and two bricks	0.097	0.005	0.089	0.208
Bar and four bricks	0.089	0.004	0.094	0.202
Bross bars and four bricks	0.089	0.004	0.094	0.202

对比表格中前三行数据可知,当暗谐振元素(介质方块)的个数变化时,明暗模谐振子间的耦合强度 Ω 表现出明显的变化,其值从 0.054 THz 增加到 0.094 THz. 这意味着随着暗谐振元素数目的增加,明暗模式

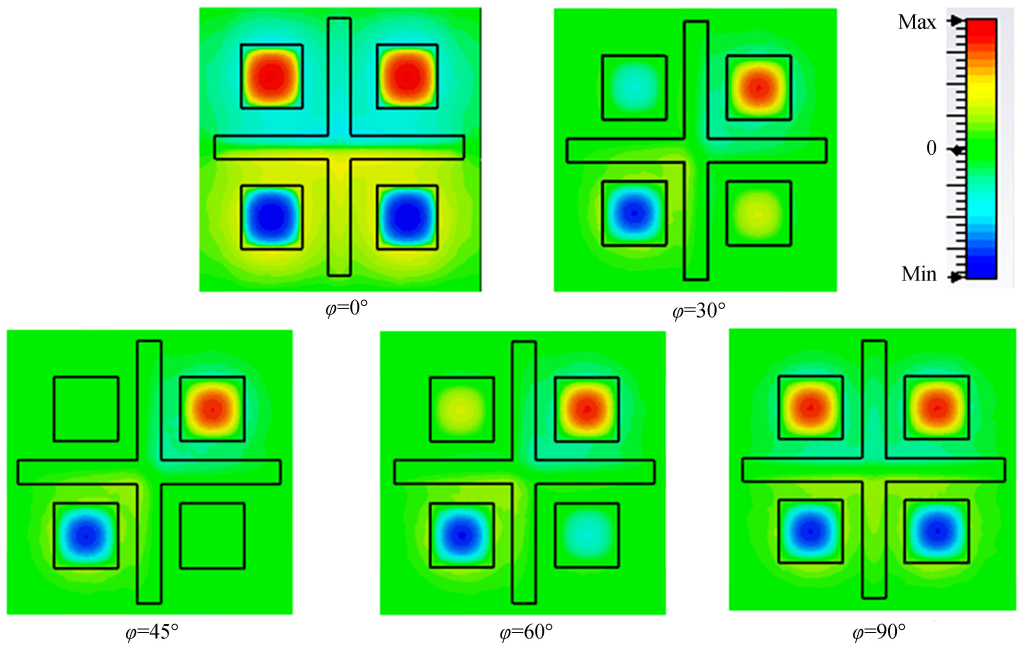
之间的耦合强度增强,很显然这与之前的分析和相关文献报道的结果是一致的^[20].而外场与明模谐振单元(介质棒)间的耦合强度 g 并未表现出很明显的变化,而是在某固定值上下波动.这说明,当暗模谐振元素增加的同时,由于此结构中受外场激励的明模谐振单元(介质棒)一直未变,因此入射电场(极化方向沿棒长方向)对明模谐振单元的激励作用(耦合强度)也较为稳定.

2.3 类 EIT 效应的极化不敏感特性

该类 EIT 效应除了带宽较宽的特点之外,同时还具备了对入射电场极化方向不敏感的特性.如图 6(a),改变电场的极化方向但仍保持电磁波垂直入射,以 y 轴为起点(极化角 $\varphi=0^\circ$)每隔 30° 仿真计算其透射曲线,结果显示其透射参数完全相同,也就是说该 EIT 透射对入射电场呈现出极化不敏感的特性.这一特性可以由该 EIT 超表面结构的 C_4 旋转对称性来说明.一般而言,超表面结构若具有全向旋转对称或 C_4 旋转对称性^[25-26],其电磁响应(如反射、透射、吸收等)就会对入射电磁波的极化不敏感.图 6(b)则给出了在不同的极化角入射情形下,在透射峰频点处该 EIT 结构表面的磁场分量 H_z 的分布情况.可以看出,当极化角在变化时,磁场并不是如之前一样均匀地分布在四个介质方块中.以 $\varphi=45^\circ$ 情况为例,此时磁场仅仅出现在左下和右上的两个方块中,并且 H_z 分量的方向是相反的,由此可以判断出两个方块中的环形电场方向一个为顺时针,另外一个为逆时针.仔细研究发现,无论是哪种极化角,四个介质方块中形成的环形电场的绕行方向总是能满足一种对应,也就是两对介质中的环形电场的绕行方向相反,强度也相当.因此,在任何极化角入射情形下,介质方块中激励形成的磁共振都能产生相消干涉,从而形成稳定不变的透射系数.



(a) Transmission spectra for different polarization angles $\varphi=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ at normal incidence



(b) H_z Distributions of the proposed dielectric EIT structures at transmission peaks for different polarization angles $\varphi=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

图 6 电场以不同极化角度正入射时的透射参数及透射峰频点(0.552 THz)处超表面结构表面磁场分量 H_z 的分布
Fig.6 Transmission spectra and H_z distributions of the proposed dielectric EIT structures at transmission peaks (0.552 THz) for different polarization angles at normal incidence

3 结论

本文提出了一种基于 TiO₂ 的全介质 EIT 超表面模型,该结构由两根十字交叉相互垂直的介质棒和四个介质方块组成,它们分别充当“亮模”和“暗模”的角色.在入射磁场的作用下,介质棒直接受入射电磁场激励产生 Mie 电谐振,通过介质棒和方块之间的相互耦合激发介质方块中的 Mie 磁共振,它们之间的相消干涉抑制了作为“亮模”的辐射,从而产生类电磁诱导透明现象.利用三维电磁场仿真软件 CST microwave studio 对该结构进行仿真模拟计算,研究表明:在电磁波垂直入射并且电场方向平行于表面时,该 EIT 结构在 0.507 THz 和 0.603 THz 两个透射谷之间产生了一透射率接近 96% 的透明窗口(位于 0.552 THz 处);并且由于其结构单元具有 C₄ 旋转对称性,使得 EIT 效应出现对入射电场极化方向不敏感的特性.此外,还仿真分析了“暗模”介质方块的数目在逐渐增加的情况下,EIT 透明窗口得以拓宽的过程.综合运用了表面电磁场分布和双谐振子耦合理论,对 EIT 效应的形成机理分别进行定性和定量的分析.本文的研究揭示了基于全介质材料构建较高频率范围的 EIT 超表面结构的基本思路、研究方法,对全介质 EIT 超表面模型的设计及性能研究提供了参考.后续可进一步研究类 EIT 超表面的其他性能,比如损耗、群延时特性以及 EIT 透明窗口的调节等.

参考文献

- [1] HEINZE G, HUBRICH C, HALFMANN T. Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **111**(3):033601.
- [2] SREEKANTH K V, ALAPAN Y, ELKABBASH M, *et al.* Extreme sensitivity biosensing platform based on hyperbolic metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2016, **15**(6):621.
- [3] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency in an ideal plasma[J]. *Physical Review Letters*, 1996, **50**(7): 5357-5360.
- [4] HARRIS S E, FIELD J E, IMAMOGLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **64**(10):1107-1110.
- [5] JENH H, XIONG B, YU I A, *et al.* Electromagnetically induced transparency and slow light in quantum degenerate atomic gases[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2013, **30**(11):2855-2863.
- [6] KASH M M, SAUTENKOV V A, ZIBROV A S, *et al.* Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas[J]. *Physical Review Letters*, 1999, **82**(26):5229-5232.
- [7] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al.* Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594-598.
- [8] WEI Zhong-chao, LI Xian-ping, ZHONG Nian-fa, *et al.* Analogue electromagnetically induced transparency based on low-loss metamaterial and its application in nanosensor and slow-light device[J]. *Plasmonics*, 2017, **12**(3):641-647.
- [9] LIANG Da-chuan, ZHANG Hui-fang, GU Jian-qiang, *et al.* Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in stereo metamaterials[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **23**(4):1-7.
- [10] WU Dong, LIU Yu-min, YU Li, *et al.* Plasmonic metamaterial for electromagnetically induced transparency analogue and ultra-high figure of merit sensor[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**:45210.
- [11] GU Jian-qiang, SINGH R, LIU Xiao-jun, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**(4):1151.
- [12] YUAN Yu-yang, ZHANG Hui-fang, ZHANG Xue-qian, *et al.* Coupling effect of bright and dark modes in THz metamaterials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(1): 0121002.
袁宇阳, 张慧芳, 张学迁, 等. THz 超材料的明暗模式耦合效应[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(1): 0121002.
- [13] HAN Song, CONG Long-qin, YANG He-lin, *et al.* Tunable electromagnetically induced transparency in coupled three-dimensional split-ring-resonator metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**:20801.
- [14] SHAO Jian, LI Jia-qi, LI Jie, *et al.* Analogue of electromagnetically induced transparency by doubly degenerate modes in a U-shaped metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(3):034106.
- [15] YANG Yuan-mu, IVAN I.K, DAYRL B, *et al.* All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**:5753.
- [16] KHARDIKOV V, IARKO E, PROSVIRNIN S. Giant red shift and enhancement of resonant light confinement in planar array of dielectric bars[J]. *Journal of Optics*, 2011, **14**(3):202-202.
- [17] ZHAO Qian, ZHOU Ji, ZHANG Fu-li, *et al.* Mie resonance-based dielectric metamaterials[J]. *Materials Today*, 2010, **12**(12):60-69.
- [18] MIROSHNICHENKO A E, KIVSHAR Y S. Fano resonances in all-dielectric oligomers[J]. *Nano Letters*, 2012, **12** (12):6459.

- [19] ZHANG Fu-li , ZHAO Qian , ZHOU Ji , *et al.* Polarization and incidence insensitive dielectric electromagnetically induced transparency metamaterial[J]. *Optics Express* , 2013 , **21**(17):19675-80.
- [20] ZHU Lei , DONG Liang , Electromagnetically induced transparency with wide band in all-dielectric microstructure based on Mie resonances[J]. *Journal of Optics* , 2014 , **16**(16)125105..
- [21] NEMEC H , KADLEC C , KADLEC F , *et al.* Resonant magnetic response of TiO₂ microspheres at terahertz frequencies[J]. *Applied Physics Letters* , 2012 , **100**(6):489.
- [22] LIU Na , GIESSEN H. Coupling effects in optical metamaterials[J]. *Angewandte Chemie International Edition* , 2015 , **49**(51):9838-9852.
- [23] LIN Hai , YANG Dong , HAN Song , *et al.* Analog electromagnetically induced transparency for circularly polarized wave using three-dimensional chiral metamaterials.[J]. *Optics Express* , 2016 , **24**(26):30068-30078.
- [24] LI Hai-ming , LIU Shao-bin , WANG Shen-yun , *et al.* Tailoring electromagnetically induced transparency with different coupling mechanisms[J]. *Scientific Reports* , 2016 , **6**:21457.
- [25] ZHU Lei , MENG Fan-yi , FU Jia-hui , *et al.* An electromagnetically induced transparency metamaterial with polarization insensitivity based on multi-quasi-dark modes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* , 2012 , **45**(45):445105-445105.
- [26] HU Sen , LIU Dan , YANG He-lin , *et al.* Analogue of ultra-broadband and polarization-independent electromagnetically induced transparency using planar metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics* , 2017 , **121**(12):123103.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 11504100)

引用格式: HU Sen, LIU Dan, YANG He-lin. Electromagnetic Induced Transparency Based on All-dielectric Metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica* , 2018 , **47**(11):1116001

胡森,刘丹,杨河林.基于全介质超表面的电磁诱导透明研究[J].*光子学报*,2018,**47**(11):1116001