

基于相变材料的可调谐高Q共振

江心远^{1*}, 宋子虚^{2*}

¹中国计量大学理学院, 浙江 杭州

²中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年2月18日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

近年来, 基于超构表面的高Q共振在纳米尺度上增强光与物质相互作用引起了广泛的关注。在这里, 我们数值演示了仅相变材料的超构表面的可调谐共振。该超构表面可以支持磁偶极子共振和环偶极子共振, 通过相变材料的相变来动态地调谐这些共振的波长。此外, 通过改变结构参数如高度、半径等均可以实现环形偶极共振和磁偶极共振相互作用产生EIT共振, 我们在超构表面上数值模拟了EIT的高Q因子。然而, 当相变材料转变为晶相时, EIT共振被关闭。可切换的高Q EIT共振在慢光器件、光学调制器和生物传感器中具有潜在的应用前景。

关键词

高Q, 相变材料, 超构表面, 电磁诱导透明, 环偶

Tunable High-Q Resonance Based on the Phase-Change Material

Xinyuan Jiang^{1*}, Zixu Song^{2*}

¹College of Sciences, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang

²College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 18th, 2024; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

In recent years, high-Q resonances based on metasurfaces have attracted widespread attention in recent years for enhancing light-matter interaction at the nanoscale. Here, we numerically demonstrate a tunable resonance from chalcogenide metasurface. The metasurface can support both a

*作者同等贡献。

magnetic dipole resonance and a toroidal dipole resonance. The wavelength of these resonances can be dynamically tuned through the phase transition of phase-change material. In addition, by changing structural parameters such as height and radius, the interaction between toroidal dipole resonance and magnetic dipole resonance can be achieved to generate EIT resonance, we numerically demonstrated a high Q factor analogue of EIT on the metasurface. However, the EIT resonances are switched off when phase-change material is transformed into the crystalline phase. The switchable high-Q EIT resonances hold potential applications in slow-light devices, optical modulators, and biosensors.

Keywords

High-Q, Phase-Change Materials, Metasurfaces, Electromagnetically Induced Transparency, Toroidal Dipole

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高品质(Q)因子共振由于增强的光与物质相互作用,对基础和应用研究具有重要意义。在过去的十年中,超构表面在纳米尺度的光操纵方面取得了重大进展[1] [2]。亚波长纳米结构支持的共振由于其锐利的光谱特征和大的局域电磁场,广泛应用于纳米光子学的各种应用,包括在高灵敏度传感[3] [4]、超低阈值激光[5] [6]、非线性谐波产生[7]等。虽然现在基于超构表面实现高Q共振已经得到了广泛的研究,但是其得到的工作波长是固定的。在实际应用中,为了满足不同的工作波长要求,需要结合一些光学可调谐材料实现可调谐的工作波长[8] [9]。近年来,可调谐超构表面引起了广泛的关注[10]。然而,在这些研究中,准BIC共振的波长位移很小,这是由于半导体和聚合物的折射率变化不大导致的[11]。

本文提出了一个波长可调的高Q共振锗碲铋(GST)超构表面,该超构表面由一个基于二氧化硅衬底的全GST的双孔结构组成,支持磁偶极子和环偶极子共振,通过GST相变实现动态调谐的高Q环偶极子共振。此外,改变结构参数还可以实现低Q的磁偶极子和高Q环偶极子共振发生光学耦合,从而实现电磁诱导透明(EIT)现象,并且可以通过几何参数和材料相变调控该EIT的群折射率。

2. 结构设计

GST超构表面周期性阵列示意图如图1(a)所示,该结构在x和y方向上都具有周期性,并且双孔的半径、孔间距和高度分别为R、D、H,且在x和y方向上的周期分别设定为 $P_x = P_y = P$ 。与硅类似,GST也是一种红外高折射率介质材料,在近红外波段所具备的低吸收损耗和高折射率特性为GST超构表面器件的设计提供了便利和可行性。图1(a)展示了结构示意图,其中红色部分表示GST结构,它被放置在 SiO_2 衬底上,材料折射率如图1(b)所示。为了研究GST阵列的光学特性,我们采用了基于有限元算法的COMSOL Multiphysics软件进行了数值计算。在计算中,我们在x和y方向上应用了周期性边界条件,而在z方向上采用了完美匹配层。GST的复介电常数来源于现有文献[12],而 SiO_2 衬底的折射率基于Palik[13]。结构参数被设定为: $P = 1100 \text{ nm}$, $R = 200 \text{ nm}$, $D = 500 \text{ nm}$, $H = 280 \text{ nm}$ 。通过这样的设计和参数设置,我们能够进一步研究和分析GST超构表面的光学性能。利用这些数值计算结果,我们可以实现该结构在光学器件和光学应用中的潜在应用和性能优势,并有助于推动光学器件和光学系统的发展,GST

超构表面的独特特性和性能优势将开启更广阔的光学应用领域。

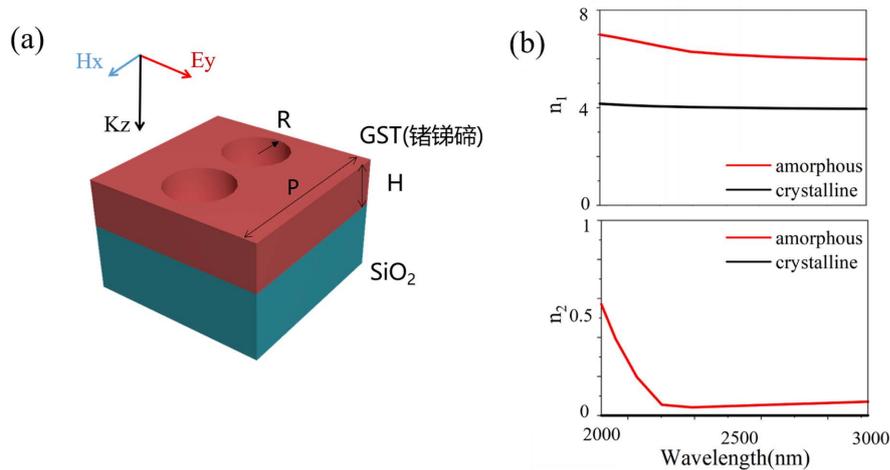


Figure 1. Diagram of the structure and material refractive index
图 1. 结构示意图及材料折射率

3. 结果与讨论

3.1. 共振模式分析

我们计算了当 GST 处于非晶相时，在 2000 nm~3500 nm 波长范围内的透射谱，如图 2(a)所示。透射谱中出现了三个共振，我们将波长 2200 nm 附近的共振标记为 mode1，将 2300 nm 附近的共振标记为 mode2，将 3000 nm 附近的共振标记为 mode3，这三个谐振也是接下来的主要研究对象。图 2(b)显示了不同 GST 结晶度下 GST 双孔结构的透射谱结果。孔间距 D 对三个模式的影响如图 2(c)所示，固定半径及结构高度不变，观察当 D 从 450 nm 增加到 550 nm 时透射谱的变化。结果表明，三个共振经历了红移，并逐渐变窄，最终消失。而 mode1 的共振线宽基本不变，且仅有轻微红移。也就是说，两个环偶共振的 Q 因子迅速增加，并在 $D = P/2$ 时达到无穷大。图 2(b)则展示了 GST 从非晶相转变为晶相态的透射谱变化，在这个过程中，随着 GST 的晶相化，其折射率逐渐增加，导致三个共振模式均呈现红移的趋势。同时，随着 GST 晶化度的增加，GST 的复折射率和虚部折射率也增加，从而导致吸收损耗的增加。从晶相态的透射谱中可以观察到，透明窗口比非晶相时显著减小。

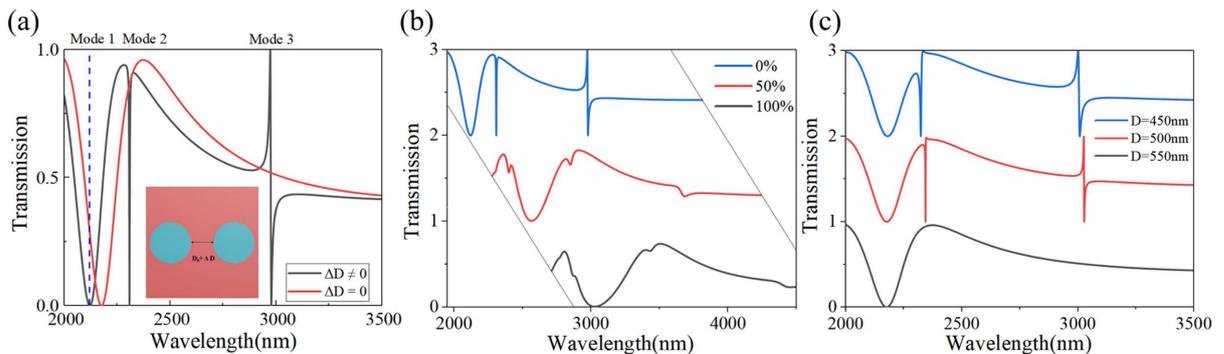


Figure 2. (a) Calculated transmission spectrum of the metasurface; (b) Transmission of different crystal phases; (c) Transmission of different D

图 2. (a) 计算的超构表面透射谱; (b) 不同晶相的透射谱; (c) 不同 D 的透射谱

为了探究这三个共振的模式, 利用 COMSOL Multiphysics 软件进行了电磁场分析。图 3(a)所示, Mode 3 共振时的电场主要集中在 y 方向上相邻的单元结构的空气孔之间, 即 y 方向上, 在这个区域中形成了一对顺时针和逆时针方向的环形位移电流, 这样形成的环路位移电流导致磁偶极子首尾相连, 激发了沿着 y 方向的环偶极子模式。而 Mode 2 与 Mode 3 类似, 图 3(b)展示了 Mode 2 的电磁场图, 其电场集中在一个单元结构的两个空气孔之间, 因此在两个气孔中形成了一对顺时针和逆时针的环形位移电流, 这样形成的环路位移电流导致磁偶极子首尾相连, 也激发了沿着 y 方向的环偶极子模式。而 Mode 1 的电场形成了单个逆时针的环形位移电流, 这激发了 x 方向的磁矩, 同时观察 x - y 平面的磁场, 证明 Mode 1 是沿着 x 方向的磁偶极模式。

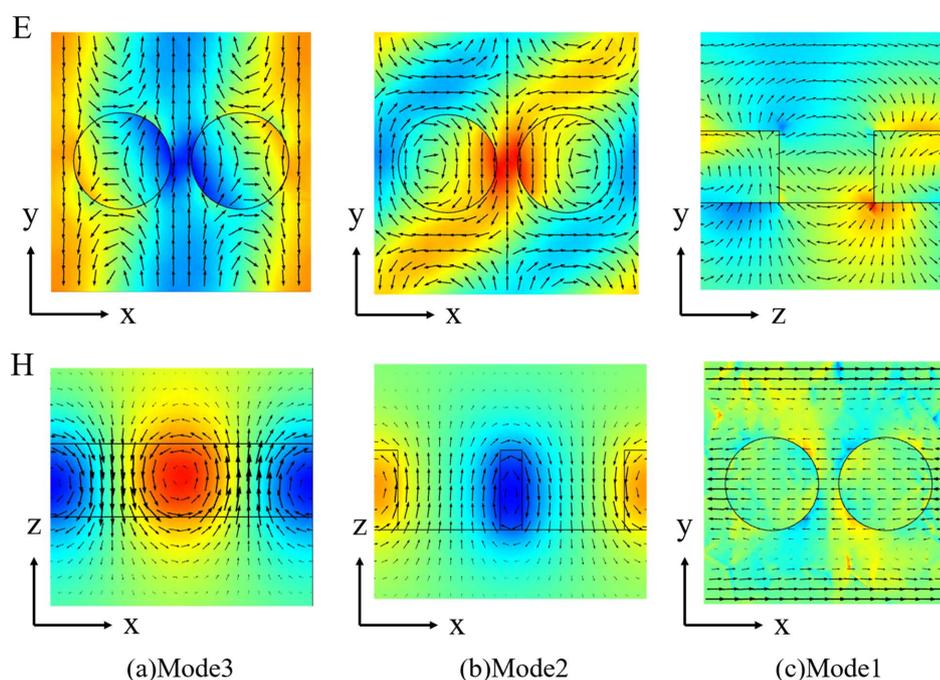


Figure 3. Resonant electromagnetic field diagram. (a) Mode 3; (b) Mode 2; (c) Mode 1

图 3. 共振的电磁场图。(a) 模式 3; (b) 模式 2; (c) 模式 1

3.2. 实现高 Q-EIT 与性能研究

由于介电纳米结构的共振模式依赖于几何参数, 因此通过改变超表面结构的参数, 可以实现对高 Q 共振的操控。在图 2(a)所示的结构基础上, 我们保持其他参数不变, 计算了非晶相 GST 在不同高度(H)下的透射谱。对应的高度分别是 280 nm、320 nm、360 nm、370 nm。从图 4(a)中可以看出, 随着高度的增加, 共振 mode 1 和 mode 2 都经历了红移。值得注意的是, 随着高度的增加, mode 1 相对于 mode 2 红移的速度要明显大得多。这意味着对于相同的高度增加, mode 1 的共振波长变化更为显著。当高度达到 370 nm 时, 高 Q mode 2 和低 Q mode 1 的共振中心逐渐靠近, 并发生相互光学耦合, 在波长 2360 nm 处出现了类 EIT 的共振。这种 EIT 现象归因于一个环偶极子共振和一个磁偶极子共振相互作用。这种类 EIT 现象的 Q 值主要取决于两个模式中高 Q 的那个模式(mode 2), 且 mode 2 的 Q 值对 GST 孔间距非常敏感, 因此也可以通过调控 D 来调控该 EIT 峰。有趣的是, 除了调节结构厚度可以产生 EIT 共振, 增大半径和减小结构周期也可以使共振 mode 1 和 mode 2 产生 EIT 共振, 如图 4(c)和图 4(d)所示。因此, 通过调整超构表面的不同几何参数, 我们可以实现类 EIT 共振的实现。

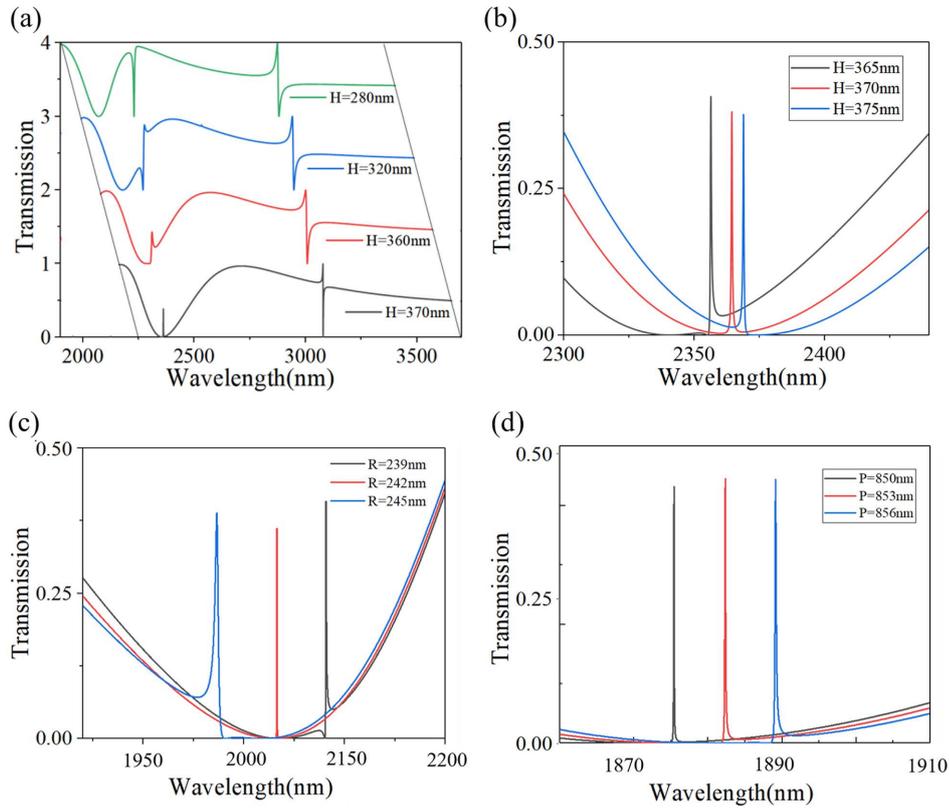


Figure 4. Transmittance of the metasurfaces with different structure parameters
图 4. 不同结构参数的超构表面透射谱

在电磁诱导透明峰附近观察到了明显的色散现象，这是由于折射率随着频率或波长的变化而发生显著的变化。导致了在这样的介质中传播的电磁波速度显著降低，从而使其适用于慢光器件。慢光效应是电磁诱导透明产生的最直接的一个效果，而群折射率是评估电磁诱导透明慢光效应的一个重要指标，可以通过以下公式计算得到群折射率 n_g [14]:

$$\tau_g = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{c}{H} \tau_g \quad (2)$$

其中， φ 表示透射相位， ω 表示角频率， c 是真空下的光速， v_g 是电磁波在超构表面结构中的群速度， H 是锗铋碲的厚度。因此，我们还计算了当 GST 处于非晶相和晶相时该结构的群折射率，如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)展示了在 y 偏振下由高度变化引起的 EIT 共振和群折射率的变化。当 GST 处于非晶相时，在波长为 2365 nm 处，由于高 Q 值的 EIT 共振的激发，GST 在非晶相状态下的群折射率可达 2600。然而，当 GST 转变为晶相时，由于 GST 的吸收损失增加，EIT 峰消失，群折射率下降到 30。图 5(c)和图 5(d)展示了在 x 偏振下由高度变化引起的 EIT 共振和群折射率的变化。当 GST 处于非晶相时，在波长为 2742 nm 处产生了一个 EIT 共振，群折射率可达 5800。然而，当 GST 转变为晶相时，EIT 峰消失，群折射率下降到 26。因此，通过使用 GST 双孔结构，我们可以实现可切换的高 Q 值 EIT 共振现象。

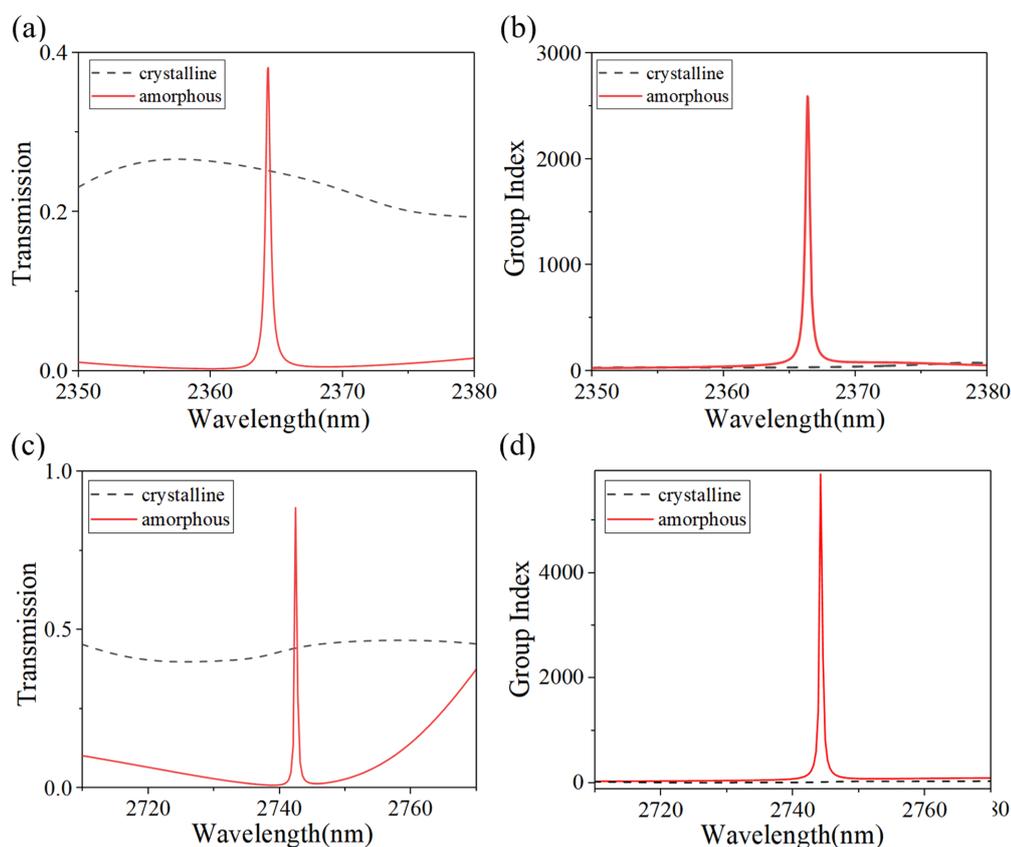


Figure 5. Switchable high-Q electromagnetically induced transparency. (a) (b) EIT under y-polarization; (c) (d) EIT under x-polarization

图 5. 可切换高 QEIT。(a) (b) y 偏振下 EIT 现象; (c) (d) x 偏振下 EIT 现象

4. 总结与展望

综上所述, 本文提出并通过数值仿真证明了全 GST 超构表面上可调谐的高 Q 值共振现象。这种高 Q 值共振是由环偶模式的激发引起的, 并且共振 Q 值可以通过调节孔间距 D 轻松实现。通过 GST 相变可以实现共振波长动态调谐。利用这种动态调谐特性, 我们可以在光学通信、光传感器和光调制器等领域实现高性能的光学器件和系统。此外, 通过调节超构表面的几何参数, 可以实现环偶和磁偶模式之间的光学耦合, 产生高 Q 类 EIT 现象。有趣的是, 调节不同的几何参数(半径、高度、周期)和不同偏振方向(x 和 y 偏振)均能够实现高 Q 值 EIT 共振。通过 GST 的相变, 我们可以实现可切换的高 Q-EIT 共振现象。所提出的 EIT 超表面具有易于设计和制造的特点, 并可应用于窄带滤波器和慢光器件等领域。

参考文献

- [1] Yu, N. and Capasso, F. (2014) Flat Optics with Designer Metasurfaces. *Nature Materials*, **13**, 139-150. <https://doi.org/10.1038/nmat3839>
- [2] Sun, S., He, Q., Hao, J., Xiao, S. and Zhou, L. (2019) Electromagnetic Metasurfaces: Physics and Applications. *Advances in Optics and Photonics*, **11**, 380-479. <https://doi.org/10.1364/AOP.11.000380>
- [3] Zhou, Y., Guo, Z., Zhao, X., Wang, F., Yu, Z., Chen, Y., Liu, Z., Zhang, S., Sun, S. and Wu, X. (2022) Dual-Quasi Bound States in the Continuum Enabled Plasmonic Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, **10**, 2200965. <https://doi.org/10.1002/adom.202200965>
- [4] Yang, Y., Kravchenko, I.I., Briggs, D.P. and Valentine, J. (2014) All-Dielectric Metasurface Analogue of Electromag-

- netically Induced Transparency. *Nature Communications*, **5**, Article No. 5753. <https://doi.org/10.1038/ncomms6753>
- [5] Hwang, M.S., Lee, H.C., Kim, K.H., Jeong, K.Y., Kwon, S.H., Koshelev, K., Kivshar, Y. and Park, H.G. (2021) Ultralow-Threshold Laser Using Super-Bound States in the Continuum. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4135. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24502-0>
- [6] Huang, C., Zhang, C., Xiao, S., Wang, Y., Fan, Y., Liu, Y., Zhang, N., Qu, G., Ji, H., Han, J., *et al.* (2020) Ultrafast Control of Vortex Microlasers. *Science*, **367**, 1018-1021. <https://doi.org/10.1126/science.aba4597>
- [7] Carletti, L., Koshelev, K., De Angelis, C. and Kivshar, Y. (2018) Giant Nonlinear Response at the Nanoscale Driven by Bound States in the Continuum. *Physical Review Letters*, **121**, Article 033903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.033903>
- [8] Cheng, H., Chen, S.Q., Yu, P., Duan, X.Y., Xie, B.Y. and Tian, J.G. (2013) Dynamically Tunable Plasmonically Induced Transparency in Periodically Patterned Graphene Nanostrips. *Applied Physics Letters*, **103**, Article 203112. <https://doi.org/10.1063/1.4831776>
- [9] Salvatore, S., David, S. and Willie, J.P. (2014) Liquid Crystal Metamaterial Absorber Spatial Light Modulator for THz Applications. *Advanced Optical Materials*, **2**, 275-279. <https://doi.org/10.1002/adom.201300384>
- [10] Yang, J., Gurung, S., Bej, S., Ni, P. and Lee, H.W.H. (2022) Active Optical Metasurfaces: Comprehensive Review on Physics, Mechanisms and Prospective Applications. *Reports on Progress in Physics*, **85**, Article 036101. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac2aaf>
- [11] Benea-Chelms, I.-C., Mason, S., Meretska, M.L., Elder, D.L., Kazakov, D., Shams-Ansari, A., Dalton, L.R. and Capasso, F. (2022) Gigahertz Free-Space Electro-Optic Modulators Based on Mie Resonances. *Nature Communications*, **13**, Article No. 3170. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30451-z>
- [12] Chew, L.T., Dong, W., Liu, L., Zhou, X., Behera, J., Liu, H., Sreekanth, K.V., Mao, L., Cao, T., Yang, J. and Simpson, R.E. (2017) Chalcogenide Active Photonics. *Proceedings of the SPIE*, **10345**, 103451B. <https://doi.org/10.1117/12.2273732>
- [13] Palik, E.D. (1998) Handbook of Optical Constants of Solids. Vol. 3, Academic, New York.
- [14] Liu, K., Lian, M., Qin, K., Zhang, S. and Cao, T. (2021) Active Tuning of Electromagnetically Induced Transparency from Chalcogenide-Only Metasurface. *Light: Advanced Manufacturing*, **2**, Article No. 19. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.019>