材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.014

介电常数近零模式与表面声子极化模式的耦合杂化研究

杨明莉，陈溢杭*

（华南师范大学 物理与电信工程学院，广州 510006）

摘　要： 介电常数近零模式为在纳米尺度上控制光与物质相互作用提供了新途径。利用衰减全反射原理分别激发Al_2O_3衬底的声子极化激元和GaN薄膜的介电常数近零模式，并且通过调整薄层厚度和优化空气层的间隙来实现双层结构模式的耦合杂化。使用传输矩阵法和有限时域差分法数值模拟计算了混合模式的电场分布和色散，结果表明两种模式由于满足强耦合条件而发生耦合劈裂。在有限时域差分法模拟的光谱中，色散关系的高频和低频分支在反交叉点都显示出强耦合，从电场图中可以观察到混合模式。混合模式具有高度传播特性和亚波长光限制的特点，可以作为未来红外和太赫兹纳米光子集成和通信设备的基础。

关键词： 表面声子激元；介电常数近零；耦合；纳米光子学；模式限制

中图分类号： O43　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0523－04

Study on the Coupling Hybrid of Dielectric Constant Near Zero Mode and Surface Phonon Polarization Mode

YANG Mingli, CHEN Yihang

(College of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: The near-zero dielectric constant mode provides a new way to control the interaction of light and matter at the nanoscale. In this paper, the principle of attenuated total reflection was used to excite the ENZ modes of phonon polariton and gallium nitride films of aluminum oxide substrates respectively. By adjusting the film thickness and optimizing the gap between air layers, the coupling hybrid of the double-layer structure mode was achieved. The transmission matrix method and finite time domain difference method were used to numerically calculate the electric field distribution and dispersion of the mixed mode, indicating that the coupling splitting occurs in the two modes due to the strong coupling conditions. In the spectrum simulated by FDTD, both the high-frequency and low-frequency branches of the dispersion relationship show strong coupling at the anti-crosspoints, and the ENZ-SPhP mixed mode can be observed from the electric field diagram. ENZ-SPhP hybrid mode has high propagation characteristics and sub-wavelength light limitation, which can be used as the basis for future infrared and terahertz nanophotonic integration and communication equipment.

Key words: surface phonon excitons; near zero dielectric constant; coupling; nanophotonics; mode limitation

收稿日期：2020－02－23.

基金项目：广东省自然科学基金项目(2015A030311018, 2017A030313035).

* **通信作者：**陈溢杭　**E-mail:** yhchen@scnu.edu.cn

0 引言

人工设计的纳米级超材料的发展推进了集成太赫兹(THz)光子学的研究进程。超材料的电磁性质一般是由磁导率和介电常数来描述的。而根据磁导率和介电常数的不同,材料可以被分成普通材料、金属材料(介电常数为负)、左手材料(介电常数和磁导率皆为负)和零折射材料等几大类。其中零折射材料可以分成三类,分别是介电常数近零(ENZ)的材料、磁导率近零的材料以及介电常数磁导率和磁导率都接近零的材料。在基于超材料的 ENZ 介质中可以实现非凡的光传播。由于 ENZ 介质所激发的 ENZ 模式在亚波长尺寸范围内对光具有强烈的限制,引起了科研人员的广泛关注和研究。ENZ 模式的特性还包括通过狭窄的畸变通道进行隧穿[1-2],通过强制相位匹配提高非线性光学转换效率[3-5]、高发射方向性[6]并实现具有打破时间反转对称性和降低散射率的极化波波导模式。然而,ENZ 模式在纳米光子应用中受到平坦的光谱色散的限制,导致模式的群速度较小且传播长度非常短[7]。纳米光子学面临的一个重要挑战在于如何实现有效的纳米级通信和远程信息传输。利用 ENZ 独特的物理学性质,可以大大促进这两个目标的实现。因此,设计一个合适的结构可以高效地激发 ENZ 模式,并将该模式与其他光子模式相互耦合,耦合的模式可以以合理的群速度保持高传播特性。

本文利用有限时域差分法(FDTD)和传输矩阵法(TMM)理论研究在薄双层厚度介质下 Al_2O_3 衬底与 GaN 薄层中的声子极化激元(SPhP)发生耦合对光子局域以及传输特性的影响。研究发现双层结构的反射谱出现了两个经过耦合劈裂的谐振现象。通过理论分析,揭示了双层薄膜结构耦合作用的物理本质,并进一步解释了对称和反对称 SPhP 耦合模式形成的原因。同时,研究了对称与反对称分支各点的场分布效果。强耦合形成的新模式同时具有参与耦合的两个谐振子的不同性质,产生了一系列有趣的现象并提供了新的应用可能性。这些耦合模式具有深亚波长限制、局部电磁场的大幅增强、固有的低损耗以及非零群速度传播等特性[8]。

1 结构模型

图 1 为奥托几何形状层状的结构示意图,通过棱镜产生的倏逝波可实现结构中极化子模式的相位匹配激发,其中高折射棱镜($n_{prism}\approx 2.4$)在可调节的空气间隙中使声子极化子的相位匹配激发。在半无限厚的 Al_2O_3 薄膜上有厚度为 50 nm 的 GaN 薄膜,薄膜与棱镜之间的填充介质为空气。采用 FDTD 对双层结构的耦合特性进行研究。GaN 薄膜表现出非色散的 ENZ 极化子模式,而 Al_2O_3 表现出表面声子极化子模式,将双层薄膜所合并的两种模式发生耦合劈裂,从而产生两个新的反交叉的色散分支。不同入射角的光谱反射率测量值可以反映出极化子色散关系。

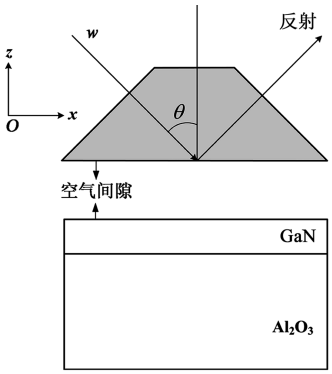


图 1 奥托模型的棱镜耦合装置示意图

本文选择的材料是极性电介质晶体,因为该材料在整个中红外波段对研究声子极化子现象具有非常好的应用前景,同时,极性电介质晶体可以在纵向光学(LO)和横向光学(TO)声子频率之间激发 SPhP 模式,该光谱范围被称为“Reststrahlen”频带(剩余射线带)[9]。当频率靠近纵向光学声子频率时,材料介电常数实部会非常接近于零。

极性电介质材料的介电常数满足 Drude 洛伦兹模型,也就是它的实部和虚部满足如下方程:

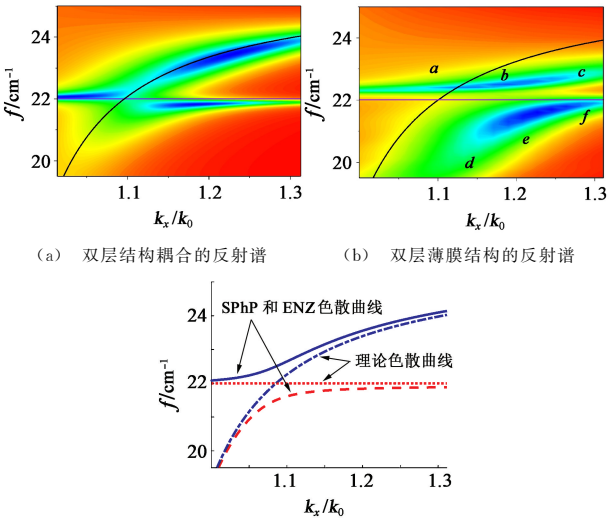
$$\varepsilon(w)=\varepsilon_{\infty}\left(1+\frac{w_{LO}^2-w_{TO}^2}{w_{TO}^2-w-\mathrm{i}w\gamma}\right) \tag{1}$$

其中,Al_2O_3 的横向声子频率 $w_{TO}=635\ cm^{-1}$,纵向声子频率 $w_{LO}=908\ cm^{-1}$,$\varepsilon_{\infty}=3.06$ 为高频下的电介质常数,$\gamma=6.3$ 为阻尼频率。GaN 的 $w_{TO}=560.1\ cm^{-1}$,$w_{LO}=742.1\ cm^{-1}$,$\varepsilon_{\infty}=5.04$ 为高频下的电介质常数,$\gamma=4$ 为阻尼频率。

2 结果与讨论

通过 TMM 计算双层结构模式中相互作用的反射谱,如图 2(a)。50 nm GaN 薄膜所支持的 ENZ 模式与 Al_2O_3 层上的 SPhP 模式发生了耦合,可以观察到双层结构中模式由于发生强耦合而劈裂成两

个分支。其中曲线和直线分别是通过 Matlab 计算得到的 Al_2O_3 和 GaN 双层介质的色散曲线。利用 FDTD 仿真获得的在不同角度平面波照射下双层薄膜结构的反射谱，如图 2(b)所示。图中 a，b，c，d，e，f 六个点分别对应图 3(a)～(f)的电场图。图 2(c)是双层结构中的 SPhP 模式和 ENZ 模式发生耦合劈裂后，产生的一个光谱透明窗口。这种窗口产生的 33.3 cm^{-1} 光谱劈裂被称为拉比(Rabi)劈裂，Rabi 劈裂的能量符合强耦合特征。



(a)　双层结构耦合的反射谱　　(b)　双层薄膜结构的反射谱

(c)　裸 SPhP 和 ENZ 色散曲线强耦合引起的上下分支理论色散曲线

图 2　双层结构耦合的反射图谱和两条色散曲线耦合的上下分支理论色散曲线

使用以下表达式来模拟 ENZ 和 SPhP 模式之间的强耦合[10]：

$$E_{\text{coupling}}^{\text{UB,LB}}(k_x)=\frac{E_{\text{SPhP}}(k_x)+E_{\text{ENZ}}(k_x)}{2}+\frac{1}{2}\left(\Omega_{\text{R}}^2+\left(E_{\text{SPhP}}(k_x)-E_{\text{ENZ}}(k_x)\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中，$E_{\text{coupling}}^{\text{UB,LB}}(k_x)$ 是耦合的高频支和低频支的色散关系，$E_{\text{SPhP}}(k_x)$ 是没有耦合的 SPhP 色散关系，$E_{\text{ENZ}}(k_x)$ 是没有耦合的 ENZ 色散关系，Ω_{R}^2 是 Rabi 劈裂能量。该模型如图 3(c)所示，在定量上与 TMM 结果吻合较好，即混合模式是通过极化强耦合演化的。在耦合点，上支和下支具有 SPhP 和 ENZ 特征的混合对称(反对称)模式。从耦合点分裂后，上支和下支分别渐进地接近 SPhP 和 ENZ 色散曲线。

为了全面地了解双层结构中形成的对称和反对称混合耦合模式，图 3 给出在两种模式下双层结构的电场分布图。通过使用 FDTD 在图 2(b)色散光谱中标志的点来模拟 20 nm ENZ/5 μm SPhP 可视化双层结构的电场分布。图 3(a)，(d)分别对应于图 2(b)中的 a，d 点，在低波矢 a，d 点处，SPhP 和 ENZ 模式具有较宽的频率间隔，限制了两种模式明显的耦合。因此，我们预期沿色散关系的上支和下支应该在很大程度上分别类似于 ENZ 和 SPhP 模式。事实上，在电场图 3(a)中所显示的类似 ENZ 模式被主要局限在 20 nm 厚层内；相反，在频率较低处的色散(图 3(d))表现出一种光学模式，该模式被局限于双层表面，电场逐渐消失到周围介质中，类似于没有耦合的 SPhP 模式。当两个色散分支相遇并交叉时，它们会发生强耦合，分别如图 3(b)，(e)所示，电场分布同时表现出类似于 ENZ 和 SPhP 模式。在混合模式的上支(图 3(b))中，对称的混合模式在 ENZ 层内表现出较强的场约束，同时倏逝衰减到周围介质中。图 3(e)模式再次在 ENZ 层内同时显示强渐逝场和场限制，表明当两个模式相互靠近时，发生强耦合产生的新模式同时具有两个模式的不同性质。最后，在远离强耦合点的波矢处(图 3(c)，(f))，最初以类似 ENZ 模式显示的上支转变为类似 SPhP 的行为(图 3(c))，而在下支中观察到相反的情况。这表明发生强耦合的模式分裂成的

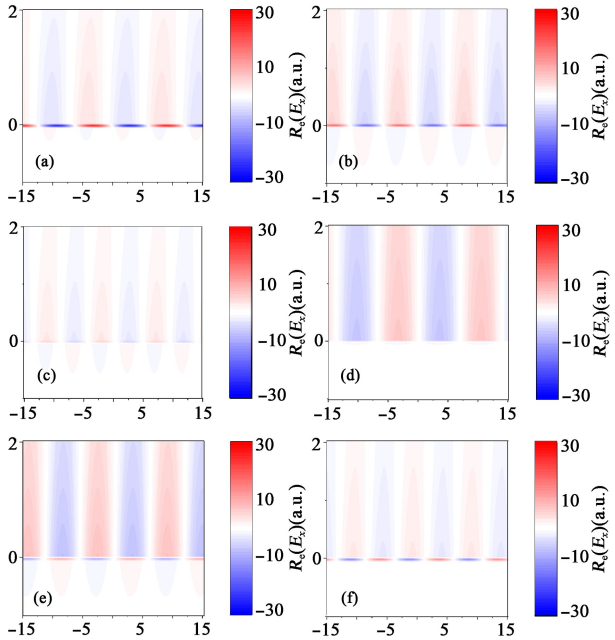
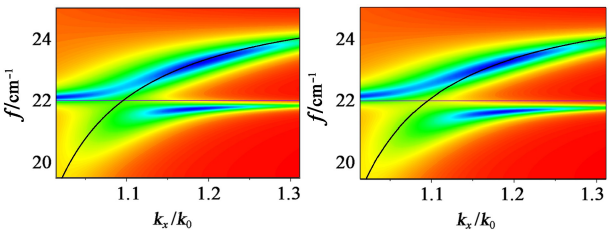


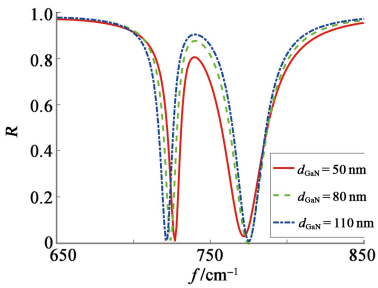
图 3　两种模式下双层结构的电场分布图。(a)具有 ENZ 主要特性的耦合高频分支的模式分布；(b)强耦合的高频支混合模式电场分布；(c)有 SPhP 主要特性的耦合高频支的模式分布；(d)有 SPhP 主要特性的未耦合低频支；(e)有强耦合的低频支混合模式的电场分布；(f)有 ENZ 主要特性的耦合低频支模式的电场分布

上下分支由于与反交叉点的距离不同，所反映出来的物理性质也不同。

最后通过改变 GaN 薄膜厚度得到双层结构的反射谱，可以观察到，两种模式耦合的强弱也会发生变化。图 4(c)表明，在双层薄膜结构中存在两个极化子分支，因此可以观察到两个共振谷，表明对于较厚的薄膜，分支的频谱分裂增加，这种趋势在 TMM 中也很明显。奥托几何形状通过调节空气间隙的宽度，对激励效率进行有效控制，在某个临界间隙处，激励效率最佳。并且每个光谱中的两个反射率下降的深度相当，这证明了这两种模式的混合特性。因此，在本文的结构中，间隙的可调性是调节极化子谐振的重要工具，可揭示有关其耦合效率的信息。通过在 Al_2O_3 衬底上调节超薄 GaN 膜的厚度可以确定两种效应随着间隙的增加在耦合的演化中起重要作用。首先，由于 SPhP 位于两层膜的界面且 ENZ 模式存在于 GaN 膜中，如图 4(a)，(b)所示，随着 GaN 薄膜厚度的增加，两种模式的空间重叠减少，从而降低了有效耦合强度。图中的曲线和直线分别代表 Al_2O_3 和 GaN 的色散曲线。



(a) GaN 膜厚度为 80 nm (b) GaN 膜厚度为110 nm



(c) 三种不同厚度 GaN 膜的反射率谱

图 4 TMM 数值计算出不同厚度的双层结构混合模式的色散关系图

3 结论

利用 FDTD 和 TMM 对双层结构中模式耦合特性展开理论研究，发现通过调节薄膜厚度和空气间隙可以调谐两种模式的耦合强度，揭示双层结构中 SPhP 模式与 ENZ 模式耦合的物理本质。通过数值模拟可以观察到耦合模式的电场分布，且在强耦合位置同时具有 SPhP 和 ENZ 的性质。这种独特的功能意味着双层膜可以在模式传播的同时，利用 ENZ 模式的行为，在近场中实现极端光限制。本文表明通过研究极性电介质异质结构中的低损耗 ENZ 极化子与 SPhP 的耦合性质，能够进一步提升 ENZ 模式在纳米光子应用中的潜力。

参考文献：

[1] Silveirinha M G, Engheta N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy and field confinement in narrow channels and tight bends using e near-zero metamaterials[J]. Physical Review B, Condensed Matter and Materials Physics, 2007, 76(24): 245109.1-245109.17.

[2] Edwards B, AluiA, Silveirinha M G, et al. Reflectionless sharp bends and corners in waveguides using epsilon-near-zero effects[J]. J. of Appl. Phys., 105(4): 044905.

[3] Argyropoulos C, Chen P Y, Giuseppe D, et al. Boosting optical nonlinearities in e-near-zero plasmonic channels[J]. Phys. Rev. B: Condensed Matter, 2012, 85(4): 045129.

[4] Suchowski H, O'Brien K, Wong Z J, et al. Four wave mixing propagation in fishnet metamaterials[C]// CLEO: QELS Fundamental Science, 2013: 14380821.

[5] Mattiucci N, Bloemer M J, Aguanno G D. Phase-matched second harmonic generation at the dirac point of a 2-d photonic crystal[J]. Opt. Express, 2014, 22(6): 6381-6390.

[6] Kim J, Dutta A, Naik G V, et al. Role of epsilon-near-zero substrates in the optical response of plasmonic antennas[J]. Optica, 2016, 3(3): 339.

[7] Passler N C, Gubbin C R, Folland T G, et al. Strong coupling of epsilon-near-zero phonon polaritons in polar dielectric heterostructures[J]. arXiv: 1811.05754, 2018: 8b01273.

[8] Nordin L, Dominguez O, Roberts C M, et al. Mid-infrared epsilon-near-zero modes in ultra-thin phononic films[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 111(9): 091105.

[9] Caldwell J D, Lindsay L, Giannini V, et al. Low-loss, infrared and terahertz nanophotonics using surface phonon polaritons[J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): nanoph-2014-0003.

[10] Runnerstrom E L, Kelley K P, Folland T G, et al. Polaritonic hybrid-epsilon-near-zero modes: engineering strong optoelectronic coupling and dispersion in doped cadmium oxide bilayers[J]. arXiv preprint: 1808.03847, 2018.

作者简介：

杨明莉(1994—)，女，硕士研究生，主要从事微纳光学研究；

陈溢杭(1979—)，男，博士，教授，主要从事光子晶体、微纳光学的研究。