

介电常数近零模式与表面等离子模式耦合实现宽带光吸收

王栋 许军 陈溢杭

Broadband absorption caused by coupling of epsilon-near-zero mode with plasmon mode

Wang Dong Xu Jun Chen Yi-Hang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 207301 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181106

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181106>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[经典瑞利-泰勒不稳定性界面变形演化的改进型薄层模型](#)

Improved thin layer model of classical Rayleigh-Taylor instability for the deformation of interface

物理学报.2018, 67(9): 094701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172613>

[爆轰驱动Cu界面的Richtmyer-Meshkov扰动增长稳定性](#)

Stability analysis of interfacial Richtmyer-Meshkov flow of explosion-driven copper interface

物理学报.2017, 66(20): 204701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204701>

[爆轰加载下弹塑性固体Richtmyer-Meshkov流动的扰动增长规律](#)

A growth study of the Richtmyer-Meshkov flow in the elastoplastic solids under explosive loading

物理学报.2017, 66(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074701>

[开放空腔壳体入水扰动流场结构及空泡失稳特征](#)

Experimental and numerical investigation on the flow structure and instability of water-entry cavity by a semi-closed cylinder

物理学报.2017, 66(6): 064702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064702>

[基于高速摄像实验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究](#)

An experimental study of water-entry cavitating flows of an end-closed cylindrical shell based on the high-speed imaging technology

物理学报.2016, 65(1): 014704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014704>

介电常数近零模式与表面等离子激元模式耦合 实现宽带光吸收*

王栋 许军 陈溢杭[†]

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

(2018年6月6日收到; 2018年7月25日收到修改稿)

介电常数为零或近零模式在微纳结构中提供了一个新的方式调控光与物质的相互作用. 本文首先利用金属圆盘阵列结构激发了表面等离子激元共振, 在共振频率处实现了光的局域效果; 然后在金属-绝缘体-金属超表面微纳结构中加入掺杂半导体材料, 利用上层金属圆盘阵列激发的表面等离子激元共振诱导介电常数近零模式的产生, 从而使得介电常数近零模式与表面等离子激元模式发生耦合, 在中红外波段实现了一个 470 nm 的宽带吸收效果; 数值模拟结果显示, 在宽带吸收处存在光场的强局域效果. 与窄带吸收相比, 宽带吸收有更广泛的应用, 比如吸收器、传感器、滤波器、微测辐射热计、光电探测器、相干热发射器、太阳能电池、指纹识别和能量收集装置等.

关键词: 表面等离子激元, 耦合, 宽带, 吸收

PACS: 73.40.Rw, 78.66.-w, 52.25.-b

DOI: 10.7498/aps.67.20181106

1 引言

金属-绝缘体-金属(MIM)超表面结构近年来引起了许多关注^[1-13], 这种结构可以实现一系列波的操作效果, 可以在轻微改变结构参数的条件下实现多样化的应用, 比如偏振控制^[3,4]、反射相位调制^[5]、完美吸收^[6-8]、异常光线反射^[9-10]、聚焦^[11]和全息图^[12]. 其中MIM超表面光吸收已成为热点, 它通过激发表面等离子激元谐振, 把光局域起来, 实现完美吸收效果^[9]. 为了得到广泛的应用, 通过两种MIM超表面组合形成一个复杂的超表面结构, 使得产生的两个表面等离子激元模式发生耦合, 实现宽带吸收效果^[13]. 但是由于表面等离子激元对光的局域性不强, 实现宽带效果达不到预期值. 最近, 又提出具有不同掺杂浓度的铟锡氧化物层实现宽带完美吸收^[14], 这种掺杂材料是介电常数为零

或近零(ENZ)材料^[15-17]; ENZ材料有其独特的性质, 当厚度足够薄时可以激发ENZ模式, 这种模式具有很强的态密度, 为增强光与物质的相互作用提供了一个新的方式. 目前ENZ材料已得到了许多应用, 包括全透射、全反射现象^[18], Goos-Hanchen位移^[19]、耗散或增益导致的不对称传输^[20]、完美吸收等.

为了达到更好的光局域效果, 本文通过在MIM超表面结构中加入ENZ材料, 由于这种材料具有强烈的局域共振模式, 所以原有表面等离子激元占主要吸收的结构转化为表面等离子激元和ENZ模式共同吸收的结构; 如果使这两种模式发生耦合, 会极大地提升吸收效果, 更好地实现完美吸收, 甚至可以在近、中红外波段实现超宽带吸收. 最后可以制作完美吸收器, 同时在电磁屏蔽、光电探测器、太阳能电池、传感器和能量收集装置等领域也具有很大的应用价值.

* 广东省自然科学基金(批准号: 2015A030311018, 2017A030313035)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yhchen@scnu.edu.cn

2 ENZ 材料

ENZ 模式是强烈的局域共振模式, 这种模式仅存在于介电常数为零或近零的亚波长纳米材料中. 由于 ENZ 模式的电场垂直于纳米薄层, 所以电磁波在正入射的情况下不能被激发^[17]; 需要引入表面等离激元模式去诱导 ENZ 模式的产生, 这样整个结构可以在光正入射时被激发, 但是 ENZ 材料厚度不能超过等离子体波长的 1/50 或者更薄^[21]. 自然界中也存在许多这样的材料, 比如金属在其等离子体频率处, 还有二氧化硅和三氧化二铝等材料在某些频段也满足介电常数实部为零的条件; 当然使用纳米加工技术, 也能实现人造 ENZ 材料^[22]. 其中最普通的是掺杂半导体材料, 通过改变其掺杂浓度和生长条件, 在整个近红外或者中红外波段可以根据人们所设想的进行调控^[23–24]. 本文选择的 ENZ 材料是掺杂氧化镉的镉 (Cdo:Dy)^[16], 因为该材料在整个中红外波段研究等离子体现象具有非常大的应用前景; 同时当载流子浓度和迁移率发生改变可以调节等离子体频率, 从而可以在不同波段处满足介电常数为零的特征.

Cdo:Dy 材料的介电常数满足 Drude 模型, 也就是它的实部和虚部满足下面的方程:

$$\epsilon_{\text{Drude}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

其中 ϵ_{∞} 是高频下的电介质常数; ω 是角频率; 等离子体频率 ω_p 和 γ 阻尼项满足如下方程:

$$\omega_p^2 = \frac{nq^2}{m_e \epsilon_0}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{q}{\mu m_e}, \quad (3)$$

(1), (2) 式可以看出等离子体频率取决于载流子浓度 n , q 是自由电子电荷量, ϵ_0 是真空介电常数, m_e 是电子有效质量, μ 是电迁移率; 这里 Cdo:Dy 材料的参数是通过实验得到的^[16], ϵ_{∞} 为 5.5, 有效电子质量取 0.21 倍单个电子有效质量. 图 1 表示不同生长条件下的掺杂氧化镉的介电常数, 可以看出介电常数实部为零的频率随着载流子浓度的不同发生改变. 本文选用的载流子浓度和迁移率分别是 $n = 3.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $\mu = 359 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 在 1870 nm 处实现介电常数为零.

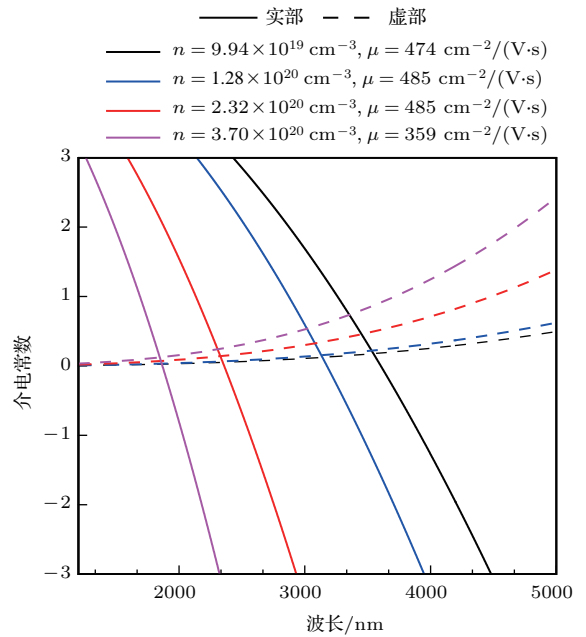


图 1 计算得到不同掺杂氧化镉材料介电常数的实部 (实线) 和虚部 (虚线)

Fig. 1. Real (solid line) and imaginary (dashed line) dielectric constant for different calculated Cdo:Dy materials.

3 结果与讨论

3.1 基于 MIM 结构中的超表面

一般的 MIM 结构由 3 层结构组成, 上层是二维周期性排列的铝金属圆盘, 下层是连续的铝金属平面, 两层铝金属中间由介质层连接; 由于下层的金属比较厚, 所以这个结构没有透射光, 整个结构的吸收率满足 $A = 1 - R$. 为了能激发共振效应, 本文采用电场平行于 x 方向正入射, 如图 2(a) 所示, 上层由周期为 800 nm 的三角晶格金属圆盘排列, 圆盘半径为 290 nm, 高 33 nm, 介质层采用的是 26 nm 厚的二氧化硅材料, 下层是 100 nm 厚的金属铝层; 最后用时域有限差分 (FDTD) 软件进行模拟计算得到图 2(b). 在共振频率处, 由于 R 为 0, 并且没有透射, 所以吸收率为 1. 图 2(c) 表示在一个单元中共振频率处电场的实部, 0—33 nm (z 轴) 是圆盘的高, 0—26 nm (z 轴) 是介质层的厚度, 290—290 nm (x 轴) 是圆盘直径, 很明显由于产生了表面等离激元共振, 光被局域到圆盘周围和介质层中, 实现了完美吸收. 如图 2(d) 所示, 随着圆盘的半径的增大, 共振波长也相应地增大.

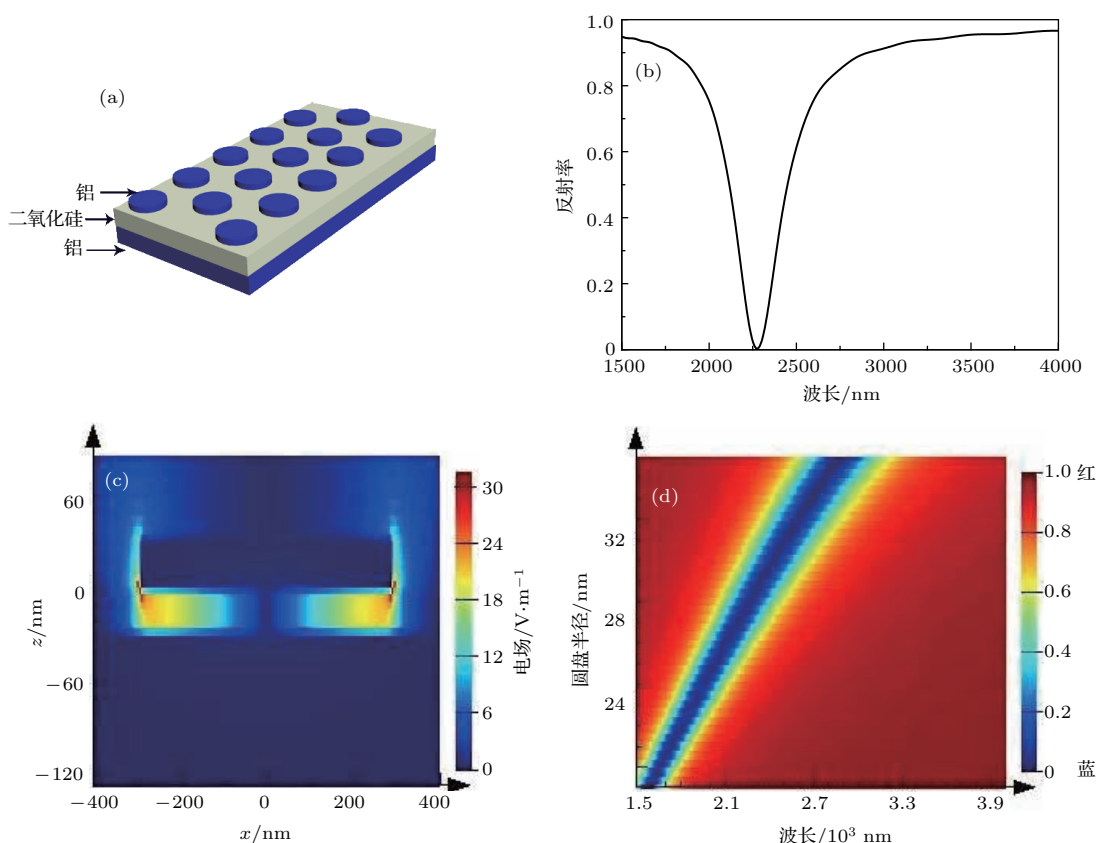


图2 (a) 由二维周期性排列的铝圆盘 MIM 结构; (b) MIM 结构在共振频率处的反射光谱; (c) 在一个单元中共振频率处电场的实部; (d) 随着圆盘的半径的增大, 共振波长也相应的增大
 Fig. 2. (a) A MIM structure of two-dimensional periodic arrangement of aluminum disks; (b) reflection spectrum of the MIM structure at the resonant frequency; (c) real part of the electric field at the resonant frequency in a unit; (d) corresponding increase in the resonance wavelength as the radius of the disk increases.

3.2 具有ENZ材料的超表面结构

由于金属损耗较大, 产生的吸收带既不是宽带也不是很好的窄带, 所以为了实现更多光吸收的应用, 本文在 MIM 结构中加入一层 Cdo:Dy 材料, 这样在不影响激发表面等离子激元谐振的情况下又激发了 ENZ 模式, 使得仅有表面等离子激元共振占主要吸收的结构变成了多种模式之间的耦合吸收效应, 实现了更佳吸收效果, 并且产生较宽的宽带吸收.

激发 ENZ 模式有多种方式 [25], 本文设计了两种结构类型来分析各自特点. 第一种结构如图 3(a) 所示, 在一般的 MIM 结构中加入一层 15 nm 的 Cdo:Dy 材料, 这个结构和图 2(a) 的结构相似, 只是在铝圆盘和介质层之间加了一层 Cdo:Dy 材料. 为了得到最佳效果, 本文优化圆盘半径为 324 nm, 高 8 nm, 介质层改为 205 nm. 介质层的改变是为了减弱表面等离子激元与 ENZ 模式耦合, 因为间隔层太厚, 表面等离子激元模式与 ENZ 模式的空间重

叠会减少从而减弱两种模式之间的耦合; 相反, 如果介质层太薄, 两种模式之间的耦合进入强耦合区域则两个共振将完全分裂成两个谐振模式 [26], 所以间隔层的厚度也有严格的要求. 为了优化宽带吸收, 表面等离激元模式和 ENZ 模式应该处于强耦合的边缘, 但仍处于弱耦合状态区域, 所以在介质层适当厚的情况下, 表面等离激元模式与 ENZ 模式的空间重叠一定时, 两种共振模式发生弱耦合效应从而实现宽带吸收 [14]. 图 3(b) 黑色曲线就是利用 FDTD 数值模拟得出的两种模式耦合后的反射光谱, 吸收宽带达 350 nm, 实现了中红外更宽的宽带吸收, 吸收效果比以往的更佳. 这个结构和一般的 MIM 结构一样, 上层的金属用来激发表面等离激元, 但是有 Cdo:Dy 材料层又会诱导 ENZ 模式产生, 并且 Cdo:Dy 薄膜层的加入改变了有效折射率, 使得在金属层与 Cdo:Dy 薄膜层交界边缘电荷聚集, 导致强局域效果. 在一定的参数下局域表面等离激元模式与 ENZ 模式有重叠部分, 重叠部分

的两种模式之间发生弱耦合效应,从而达到完美的宽带吸收效果.共振波长的红移是由于Cdo:Dy材料层的厚度增加,其色散曲线会向长波长移动,使得ENZ模式远离ENZ频率^[27],所以耦合产生的宽带也随Cdo:Dy材料层的厚度增加发生红移.

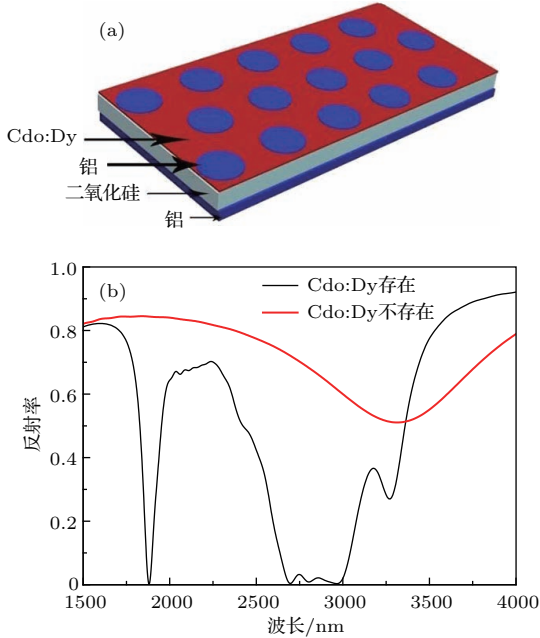


图3 (a)在MIM结构中加入一层Cdo:Dy材料的结构图;(b)有Cdo:Dy层结构和去掉Cdo:Dy层结构的反射光谱
Fig. 3. (a) Structure diagram of the MIM structure added by Cdo:Dy material nanolayer; (b) with the Cdo:Dy nanolayer and reflection spectrum of the structure with the Cdo:Dy nanolayer removed.

作为对比,图3(b)红色的曲线表示去掉ENZ层的反射光谱,去掉ENZ层后其反射率大幅增加,红线的谷值说明在此波段处确实有一个弱的表面等离子共振但是没有宽带吸收;而引入了Cdo:Dy材料,既产生ENZ模式又加强了表面等离子强度,利用这些模式之间的耦合达到了宽带吸收.并且和一般的MIM结构相比(图2),其宽带吸收增大超过一个数量级.为了解释两种模式之间的耦合,图4是选取的图3中的3个频率点的电场图与磁场图,分别是ENZ频率、宽带吸收中心波长和等离子体频率.其中图4(a)表示在一个单元中ENZ频率(1870 nm)处电场的实部, z 轴表示一个模拟单元的厚度, x 轴表示一个单元的周期; $-324\sim 324$ nm (x 轴)是Al圆盘的直径, $0\sim 8$ nm (z 轴)是圆盘的高度(图4中最上面的虚线框是圆盘的正视图),由于表面等离子共振所以圆盘周围有电场分布; $0\sim 15$ nm (z 轴)是ENZ材料层

(图4用虚线框表示), $-15\sim 320$ nm (z 轴)是介质层与金属镜面.很明显电场几乎都是局域在ENZ材料层中(除了很弱的表面等离激元),说明此处诱导产生了ENZ模式,这种模式具有很大的态密度,有场增强效果.图4(b)是ENZ频率处磁场的实部图.图4(c)和图4(d)表示在一个单元中吸收宽带中心波长(2838 nm)处电场和磁场的实部.其电场局域在Cdo:Dy材料层中和圆盘周围,并且光局域强度高于图4(a)的强度,说明耦合增加了光局域效果,同时其磁场也得到了增强.图4(e)和图4(f)表示在一个单元中表面等离激元共振处(3270 nm)电场和磁场的实部.其主要是表面等离激元局域引起的,相对强度比图4(c)弱许多.总之,其物理机理与图2原理相似.当光垂直照射到超表面结构时,金属与Cdo:Dy材料周围聚集电荷,从而诱导下层的金属产生相反的电流,上下两层形成环形电流,产生磁共振,从而在上下两层之间产生强的磁场局域效果;在这种条件下又激发了Cdo:Dy材料的ENZ模式,在相互作用下,更好地实现光的局域效果.从全部电场图来分析,波段在1870 nm附近的以ENZ模式为主,在3270 nm附近及以后波段以表面等离激元共振吸收为主,在2838 nm附近两种模式都存在,并且这两种模式重叠发生耦合效应,产生更强的光局域效果.因此,可以得出光的宽带吸收是由ENZ模式与表面等离激元模式之间发生耦合产生的现象.

另一结构如图5(a)所示,在一般的MIM结构中加入柱状Cdo:Dy材料而不是像图3的层状,这样的结构可以减少光的辐射.为了得到最佳效果,通过理论分析计算得到优化的金属圆盘与Cdo:Dy材料半径都为220 nm,高分别是10 nm和26 nm,介质层仍是适当的厚度,为205 nm,避免过厚与过薄,以达到最好的宽带吸收效果.图5(b)黑色曲线展示了表面等离激元模式和ENZ模式耦合后的反射光谱,很明显其吸收宽带达470 nm,实现了更宽的宽带吸收效果.作为对比,图5(b)红色曲线表示去掉ENZ层后的反射光谱,同样,去掉ENZ层后反射率大幅增加,只存在一个弱的表面等离激元.并且和图3结构相比,这种结构能更好地局域光,更好地实现宽带吸收效果.其机理是当光垂直照射到Cdo:Dy材料圆盘-绝缘体-金属结构时,不能激发ENZ模式(这是由于激发ENZ模式需要电场垂

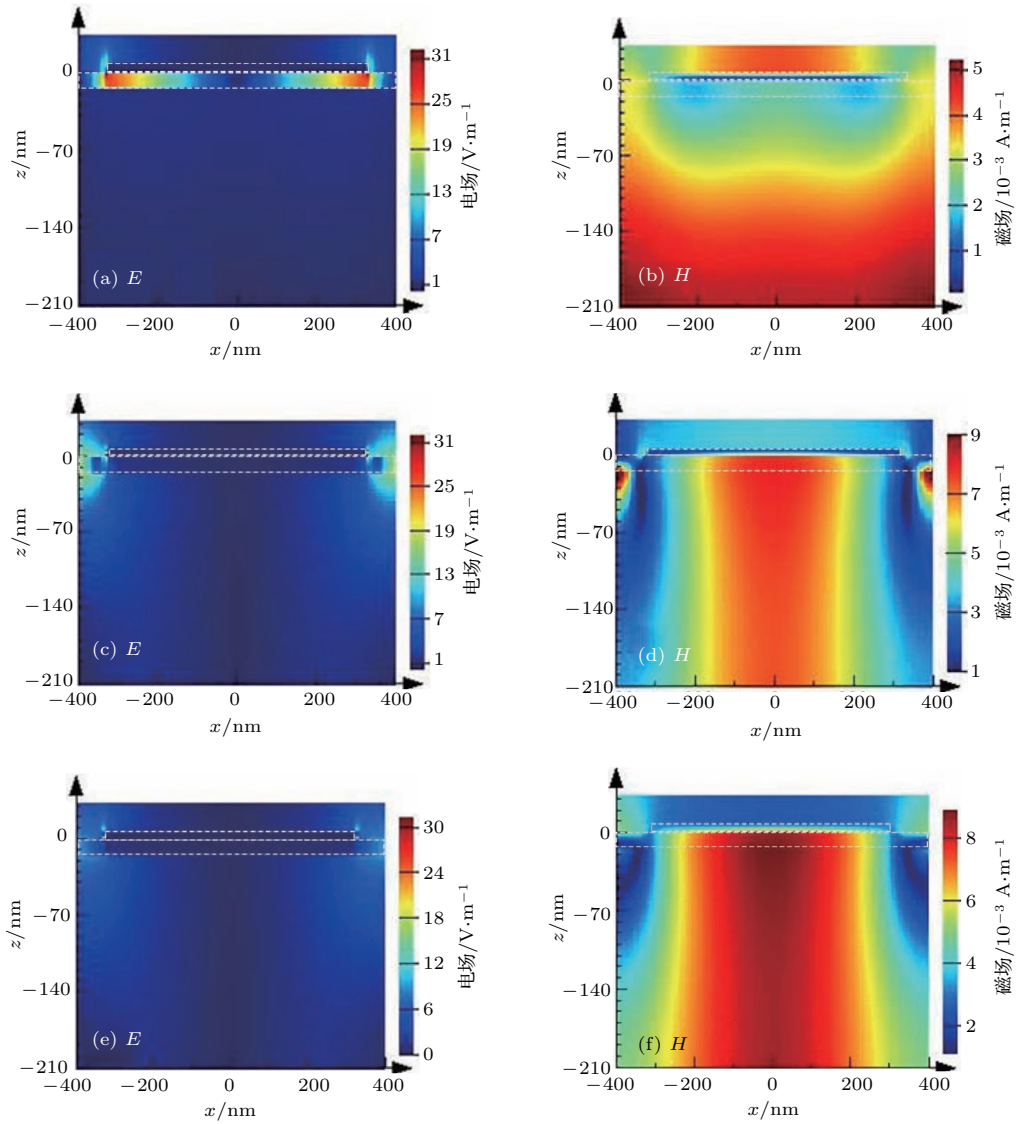


图4 电场与磁场分布, 最上面的虚线框是 Al 圆盘的正视图, 下面的虚线框是 Cdo:Dy 材料层的正视图 (a), (b) 在一个单元中 ENZ 频率 (1870 nm) 处电场的实部和磁场的实部; (c), (d) 在一个单元中吸收宽带中心波长 (2838 nm) 处电场和磁场的实部; (e), (f) 在一个单元中表面等离子共振处 (3270 nm) 电场和磁场的实部

Fig. 4. Electric field and magnetic field distribution, the uppermost dashed frame is the front view of the Al disks, and the lower dashed frame is the front view of the Cdo:Dy material nanolayer: (a), (b) Real part of electric field and magnetic field at the ENZ frequency (1870 nm) in a unit; (c), (d) real part of the electric field and magnetic field at the broadband center wavelength (2838 nm) in a unit; (e), (f) real part of the electric field and magnetic field at the the surface plasmon resonance (3270 nm) in a unit.

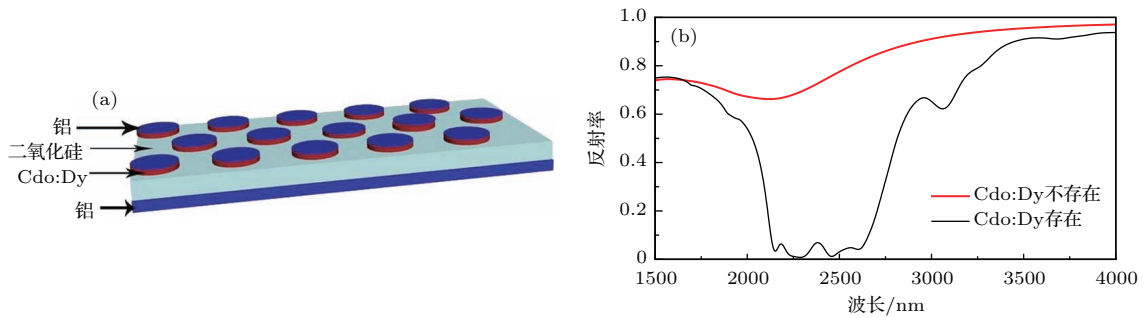


图5 (a) 在 MIM 结构中加入柱状 Cdo:Dy 材料的结构图; (b) 具有 Cdo:Dy 材料结构和去掉 Cdo:Dy 材料结构的反射光谱

Fig. 5. (a) Structure diagram of the MIM structure added by Cdo:Dy material disks; (b) reflection spectrum of the structure with the Cdo:Dy disks and with the Cdo:Dy disks removed.

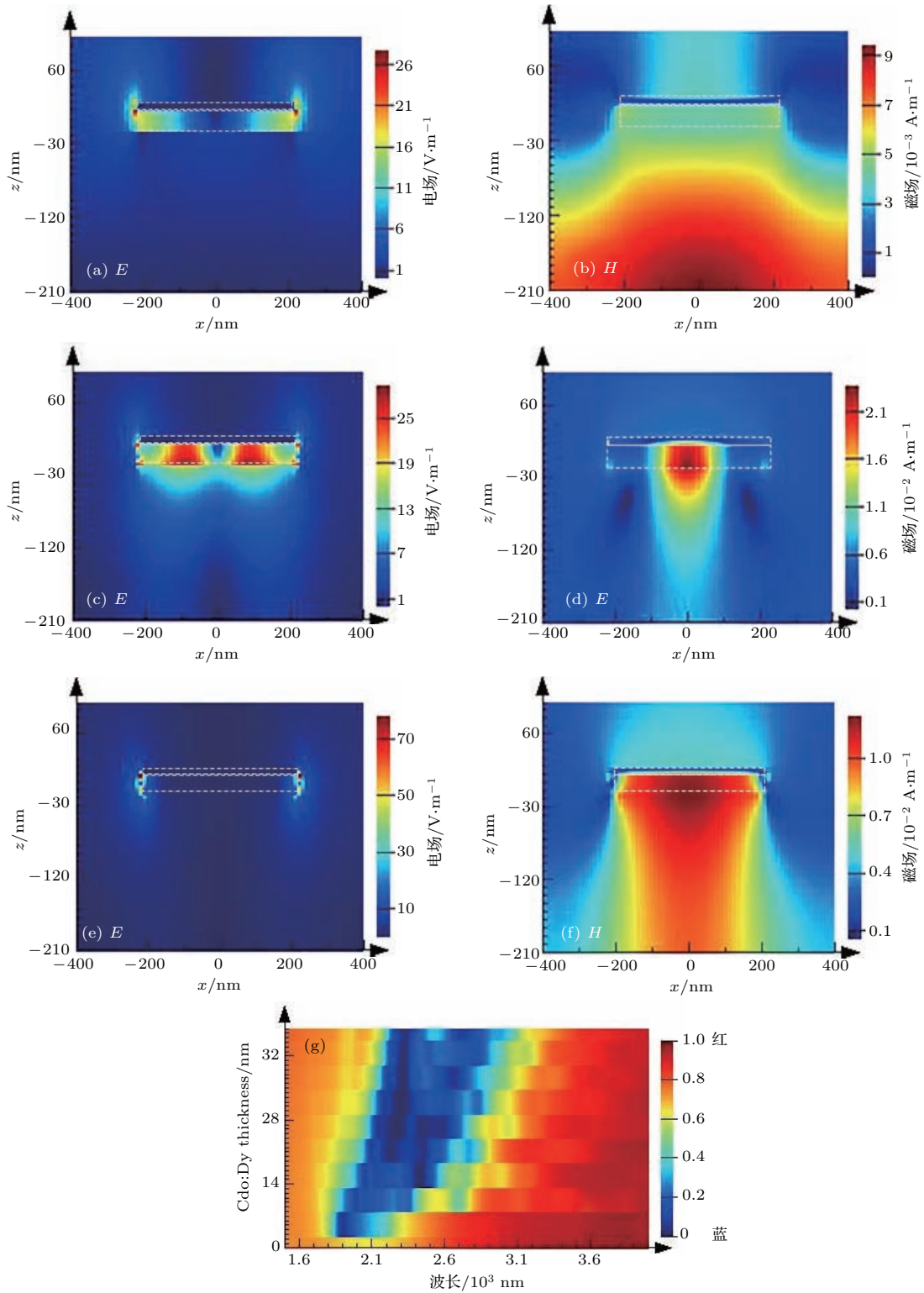


图6 电场与磁场分布 (a), (b) 在一个单元中ENZ频率(1870 nm)处电场的实部和磁场的实部; (c), (d) 在一个单元中吸收宽带左端边缘的波长(2140 nm)处电场和磁场的实部; (e), (f) 在一个单元中吸收宽带右端边缘的波长处(2625 nm)电场和磁场的实部; (g) 随着 CdO:Dy 层厚度的增加, 宽带吸收的宽带位置发生红移

Fig. 6. Electric field and magnetic field distribution: (a), (b) Real part of electric field and magnetic field at the ENZ frequency (1870 nm) in a unit; (c), (d) real part of the electric field and magnetic field at the wavelength of the left end edge of the broadband (2140 nm) in a unit; (e), (f) real part of the electric field and magnetic field at the wavelength of the right end edge of the broadband (2625 nm) in a unit; (g) as the thickness of the CdO:Dy nanolayer increases, the position of the broadband absorption is red shifted.

直于界面), 也不会有场的局域效果, 所以本文设计了金属圆盘-Cdo:Dy材料圆盘-绝缘体-金属结构. 当光垂直照射到这种结构时, 由于金属圆盘阵列激发表面等离激元(图5(b)红色的线, 表面等离激元频率为2100 nm), 被激发的表面等离激元在短波长处能够激发ENZ模式, 在长波长处Cdo:Dy材料圆盘也能激发局域表面等离激元模式(这是由于Cdo:Dy材料也有负的介电常数, 类似于金属有等离子体频率). 因此ENZ模式、金属圆盘表面等离激元模式和Cdo:Dy材料圆盘的局域表面等离激元模式三者共同作用下, 实现宽带吸收. 设计的这种结构能实现更宽的吸收, 但其辐射出去的光也会减少, 增强了光的局域, 达到更好模式耦合.

同样, 为了更清晰地理解其物理的本质, 本文也选取了图5中的3个点分析其电场与磁场分布, 这3个点分别是ENZ频率、宽带吸收的左右两端. 图6(a)和图6(b)表示在一个单元中ENZ频率(1870 nm)处电场和磁场的实部. -220—220 nm (x 轴)是Al圆盘的直径, 11—21 nm (z 轴)是圆盘的高度(图6中最上面的虚线框是Al圆盘的正视图), 11—15 nm (z 轴)是Cdo:Dy材料薄膜的高度(图6中最下面的虚线框是Cdo:Dy材料圆盘的正视图), 很明显有电场局域在Cdo:Dy材料层中和圆盘周围, 说明确实是金属阵列产生的表面等离激元激发了ENZ模式. 图6(c)和图6(d)表示在一个单元中宽带吸收的左端边缘的波长(2140 nm)处的电场和磁场的实部. 很明显ENZ模式和表面等离激元模式都有场的局域效果, 并且ENZ模式占主要吸收地位. 同样, 图6(e)和图6(f)表示在一个单元中宽带吸收的右端边缘的波长(2625 nm)处的电场和磁场的实部, ENZ模式明显弱一些, 但光的局域强度仍旧很强, 这是由于金属圆盘和Cdo:Dy材料圆盘也产生了局域表面等离激元模式, 电荷聚集在金属圆盘和Cdo:Dy材料圆盘周围. 而在2140—2625 nm之间有ENZ模式、金属圆盘产生的表面等离激元共振和Cdo:Dy材料圆盘产生的局域表面等离激元共振, 这3种模式共同作用下, 实现了一个470 nm吸收宽带. 图6(g)描述的是随着Cdo:Dy材料层的厚度的增加ENZ模式有明显的红移现象, 这就是本文前面提到的为什么ENZ模式会偏离ENZ频率. 由于这个红移的产生, 其宽带的位置也随Cdo:Dy层的厚度增大而向长波长移动. 在Cdo:Dy厚度达26 nm时, 有一个最佳的吸收宽

带为470 nm, 实现了中红外宽带吸收, 宽带效果比以往的结果好1倍.

4 结 论

完美吸收对光与物质相互作用的研究具有重要的意义, 加强和控制光吸收在光电子学等领域起着很大的实用价值. 本文通过设计了不同的结构等方法, 用FDTD进行模拟计算实现了超表面宽带吸收效果, 宽带吸收在中红外波段达470 nm. 并通过电场、磁场图也能看出光的宽带吸收是由ENZ模式与表面等离激元模式之间发生耦合产生的现象. 因为通过载流子浓度和迁移率发生改变可以调节等离子体频率, 所以理论上可以在中红外任意波段实现宽带吸收现象. 本文相对于之前的含超表面吸收特性的性能优化和吸收器件设计迈进了一步, 为实际应用中的吸收器件的设计和制作提供可靠的理论依据.

参考文献

- [1] Qu C, Ma S J, Hao J M, Qiu M, Li X, Xiao S Y, Miao Z Q, Dai N, He Q, Sun S L, Zhou L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 235503
- [2] Hao J, Ren Q, An Z, Huang X, Chen Z, Qiu M 2009 *Phys. Rev. A* **80** 023807
- [3] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I 2013 *Opt. Lett.* **38** 513
- [4] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [5] Pors A, Bozhevolnyi S I 2013 *Opt. Express* **21** 27438
- [6] Hu C G, Zhao Z Y, Chen X N, Luo X G 2009 *Opt. Express* **17** 11039
- [7] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342
- [8] Watts C M, Liu X, Padilla W J 2012 *Adv. Mater.* **24** 98
- [9] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [10] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, Juan T K, Chen W T, Liao C Y, He Q, Xiao S Y, Kung W T, Guo G Y, Zhou L, Tsai D P 2012 *Nano Lett.* **12** 6223
- [11] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, Bozhevolnyi S I 2013 *Nano Lett.* **13** 829
- [12] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, Huang Y W, Sun G, Liao C Y, Hsu W L, Lin H T, Sun S L, Zhou L, Liu A Q, Tsai D P 2014 *Nano Lett.* **14** 225
- [13] Hendrickson J, Guo J, Zhang B, Buchwald W, Soref R 2012 *Opt. Lett.* **37** 371
- [14] Hendrickson J R, Vangala S, Dass C, Gibson R, Goldsmith J, Leedy K 2018 *ACS Photonics* **5** 3
- [15] Campione S, Wendt J R, Keeler G A, Luk T S 2016 *ACS Photonics* **3** 293
- [16] Sachet E, Shelton C T, Harris J S, Gaddy B E, Irving D L, Curtarolo S 2015 *Nat. Mater.* **1** 414

- [17] Campione S, Liu S, Benz A, Klem J F, Sinclair M B, Brener I 2015 *Phys. Rev. Applied* **4** 044011
- [18] Xu Y D, Chen H Y 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 113501
- [19] Xu Y D, Chan C T, Chen H Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 8681
- [20] Fu Y Y, Xu Y D, Chen H Y 2016 *Opt. Express* **24** 1648
- [21] Campione S, Brener I, Marquier F 2015 *Phys. Rev. B* **91** 121408
- [22] Alú A Má, Silveirinha R G, Salandrino A, Engheta N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 155410
- [23] Kinsey N, Devault C, Kim J, Ferrera M, Shalaev V M, Boltasseva A 2015 *Optica* **2** 616
- [24] Naik G V, Shalaev V M, Boltasseva A 2013 *Adv. Mater.* **25** 3264
- [25] Campione S, Kim I, De C D, Keeler G A, Luk T S 2016 *Opt. Express* **24** 18782
- [26] Hendrickson J R, Vangala S, Dass C K, Gibson R, Leedy K, Walker D, Cleary J W, Luk T S, Guo J P 2018 arXiv:1801.03139 [physics. optics]
- [27] Badsha M A, Jun Y C, Chang K H 2014 *Opt. Commun.* **332** 206

Broadband absorption caused by coupling of epsilon-near-zero mode with plasmon mode*

Wang Dong Xu Jun Chen Yi-Hang[†]

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

(Received 6 June 2018; revised manuscript received 25 July 2018)

Abstract

Epsilon-near-zero mode provides a new path for tailoring light-matter interactions on a nanoscale because of its unique characteristics and ability to be used in many scientific fields. Among these applications, broadband absorption has aroused the considerable interest in photonic research. In this paper, we first show that the surface plasmon resonance is excited by the metal disk array structure without dysprosium-doped cadmium oxide nanolayer, and the structure achieves the local effect of light at a certain wavelength. In addition, in order to be able to use this new technique to achieve a broadband absorption, we take advantage of the surface plasmon resonance to excite the epsilon-near-zero mode which cannot be excited under normal incidence but has a very large density of states. Then, we show that over one order of magnitude increase in the absorption band of a periodically patterned metal-dielectric-metal structure can be obtained by integrating a dysprosium-doped cadmium oxide material into the insulating dielectric gap region. We analyze the absorption band at mid-infrared wavelength comprising plasmonic metamaterial resonators and epsilon-near-zero modes supported by dysprosium-doped cadmium oxide material. The two resonance modes lie in the weak coupling regime and achieve a 470 nm wideband light absorption. Finally, we perform numerical simulations by using the finite-difference-time-domain method to investigate the relationship between the epsilon-near-zero mode and the surface plasmon resonance mode. It is sure that the whole broadband mightily has the local effect of light. The epsilon-near-zero mode mainly is excited at the short wavelength of the broadband, and the surface plasmon resonance mode mainly focuses on long wavelength of the broadband. The simulation demonstrates that the two resonance modes are coupled to achieve a broadband absorption. Additionally, the dielectric constants are tunable by doping density, resulting in plasma frequency change, where the real part of the dielectric constant becomes zero at plasma frequency. Broadband absorption theoretically can be realized in any band of mid-infrared wavelength due to plasma frequency changing. Broadband absorption relaxes the single wavelength condition in previous absorption studies, and compared with the narrowband absorption, broadband absorption at present has many applications, such as in absorbers, sensors, filters, coherent thermal emitters, microbolometers, photodectors, solar cells, fingerprint recognition, energy harvesting devices, etc.

Keywords: plasmonic, coupling, wideband, absorption

PACS: 73.40.Rw, 78.66.-w, 52.25.-b

DOI: 10.7498/aps.67.20181106

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2015A030311018, 2017A030313035).

† Corresponding author. E-mail: yhchen@scnu.edu.cn