

专题: 光学超构材料

等离激元能带结构与应用*

刘亮¹⁾ 韩德专^{2)†} 石磊^{3)‡}

1) (绵阳师范学院数理学院, 绵阳 621000)

2) (重庆大学物理学院, 重庆 401331)

3) (复旦大学物理学系、微纳光子结构教育部重点实验室, 表面物理重点实验室, 上海 200433)

(2020年2月8日收到; 2020年3月22日收到修改稿)

近些年来, 表面等离激元因其具有强局域、亚波长和高场强等特殊的光学性质而备受关注, 在化学、生物、通信、纳米能源等各领域得到了广泛的研究. 为了更好地控制表面等离激元的激发、传播和辐射, 具有能带结构的周期性表面等离激元结构被广泛的研究. 本文全面综述了具有等离激元能带的微纳结构、能带的产生机制与其特殊的性质, 包括连续谱中的束缚态、波导、全带隙、拓扑等. 在此基础上, 基于等离激元能带设计所开展的一些应用也予以系统总结. 最后, 随着新材料的发现, 本文还简要介绍了二维材料石墨烯等离激元能带和它的一些应用.

关键词: 表面等离激元, 能带, 光子晶体, 石墨烯**PACS:** 73.20.Mf, 73.20.At, 42.70.Qs, 78.67.Wj**DOI:** 10.7498/aps.69.20200193

1 引言

表面等离激元因具有对光的选择性散射与吸收、局域的场增强、以及束缚在金属表面等特点, 使其在增强透射^[1,2]、传感器^[3-7]、纳米天线^[8-12]、超分辨率成像系统^[13]、表面增强拉曼光谱^[14-18]、激光器^[19,20]、超构材料^[21-27]等方面得到了广泛的研究和应用. 另一方面, 能带理论最初是研究固体中电子运动的基础理论. 在光子体系中, 能带理论是由介电常数周期性变化的介质即光子晶体引入的. 光子晶体最早因其能带中具有禁带而备受关注. 高品质因子的光子晶体微腔^[28,29]和低损耗的波导^[30,31]被随之发现. 而后基于对光子体系中能带的研究, 能带中布洛赫态的性质也被一一挖掘, 从

负折射^[32]到超棱镜效应^[33], 从漏波模式^[34]到高功率光子晶体激光器^[35,36], 从近零折射率的构筑^[37]到全角度阻抗匹配的实现^[38], 从宇称时间反演等类量子效应的发现^[39]到单向非互易的光输运^[40], 不一而足. 最近, 受到凝聚态物理中拓扑绝缘体的启发, 光子拓扑绝缘体也被大量的研究^[39,41-54], 描述体系整体能带性质的第一类^[55]和第二类^[56]陈数被报道. 实际上, 不论任何波, 即使是声波^[57]或水波^[58], 只要其受到周期性的调制, 都将具有类似于电子和光子一样的能带结构. 将能带结构与表面等离激元材料结合, 使人们可以像控制半导体中的电子一样自由的控制表面等离激元, 一直是等离激元领域的一个重要研究方向. 同时, 随着研究等离激元能带结构的开展, 面向未来的新型等离激元材料和器件^[59,60]正在不断涌现. 通过对现有成果的

* 国家自然科学基金 (批准号: 11774063, 11727811, 91750102)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301100, 2016YFA0302000, 2018YFA0306201)、上海市科委基金 (批准号: 17ZR1442300, 17142200100) 和重庆大学校长专项基金 (批准号: 2019CDXZWL002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dzhan@cqu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lshi@fudan.edu.cn

总结, 不仅能够对等离激元能带结构的性质进一步深入了解, 也将对后续领域发展和应用有所启发.

本文将表面等离极化激元 (surface plasmon polariton) 简称为 SPP. 表面等离激元 (surface plasmon, SP) 一般仅指由于电子相干的集体振动在金属表面处形成的元激发. 电子的振动必定伴随着表面附近电磁场的产生, 两者耦合在一起总称 SPP. 在纳米颗粒体系中, 由于这种元激发的电磁场在三个维度都是局域的, 一般称为局域表面等离激元 (localized surface plasmon), 简称 LSP.

2 等离激元微结构分类与场分布

首先, 介绍具有等离激元能带的典型微结构, 主要有如下四种: 第一种, 刻蚀周期性孔洞的金属薄膜, 如图 1(a) 和图 1(b)^[61] 所示; 第二种, 周期性排布的金属颗粒阵列, 如图 1(c) 和图 1(d)^[62] 所示; 第三种, 覆盖着介质光子晶体的金属薄膜, 如图 1(e) 和图 1(f)^[63] 所示; 第四种, 表面覆盖着介质纳米颗粒的金属薄膜, 如图 1(g) 和图 1(h)^[64] 所示.

对应于上述不同的结构, 其所支持的 SPP 模式, 尽管相互类似但其成因和空间分布却不尽相同, 如图 2 所示^[65]. 对于平金属情况, 根据麦克斯

韦方程组和边界条件, 可以计算得到 SPP 的色散公式为: $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)}$. 其中 β 是传播常数, k_0 为真空波矢, ϵ_m 和 ϵ_d 分别是金属和介质的介电常数. 该色散曲线在光线以下, 因此 SPP 的场被束缚在金属与介质的界面附近, 沿着金属与介质的表面传播. 从图 2(a) 可以看到, SPP 在垂直于界面的方向上是衰减的. 正是 SPP 的这种亚波长的局域和场增强效应, 使它在物理、化学、能源、信息等领域得到广泛的研究和应用. 在平金属情况, 其所支持的 SPP 模式来源于平金属内自由电子的集体振荡与光的相互耦合. 与平金属对应, 另一种情况是由金属微结构作为基本单元构筑的周期性结构, 以图 2(b) 为例. 单一的金属纳米颗粒本身支持局域表面等离激元模式. 由于与周围金属颗粒存在耦合效应, 金属纳米颗粒上的局域表面等离激元相互作用而产生波导模, 对应的场同样局域在金属纳米颗粒的表面, 并且沿着金属颗粒链传播. 本质上, 此类传播的表面等离激元波导模式来源于金属纳米结构中偶极甚至更高极矩的耦合. 上述两类典型 SPP 模式在工作频率降低时, 从色散上看, SPP 的波矢与平行于界面传播的等频率光线的波矢接近, 导致此时场在金属/介质表面的束缚很弱. 同时, 在低频时, 传统如金银等贵金属的电导率很大,

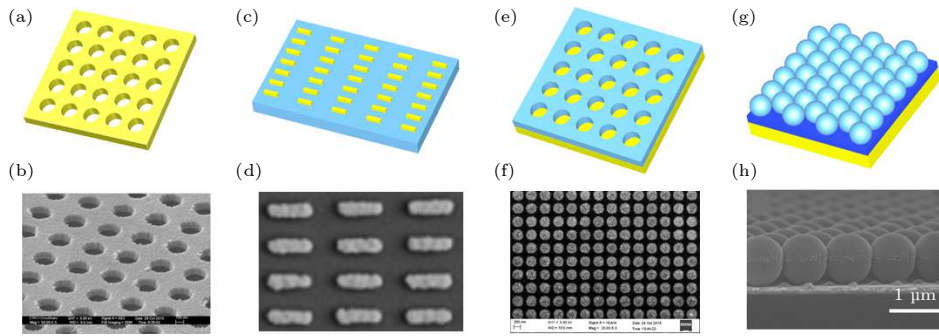


图 1 具有等离激元能带的结构示意图和扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 照片 (a), (b) 金属薄膜刻蚀周期性的孔洞^[61]; (c), (d) 金属纳米颗粒周期性排列^[62]; (e), (f) 金属表面覆盖介质光子晶体^[63]; (g), (h) 金属表面覆盖自组装介质小球^[64]
 Fig. 1. Schematic views and SEM images of structures possessing plasmonic band structures: (a), (b) Metal films with periodic arrays of sub-wavelength holes^[61]; (c), (d) periodic arrays of metal particles^[62]; (e), (f) metallic substrate coated with dielectric photonic crystal^[63]; (g), (h) metallic substrate coated with self-assembled dielectric spheres^[64].

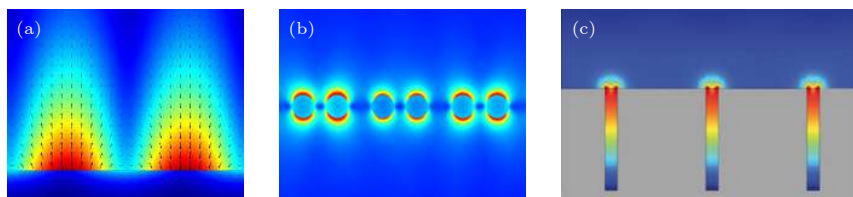


图 2 (a) 表面等离极化激元、(b) 局域表面等离激元和 (c) 人工表面等离激元^[65] 的场分布
 Fig. 2. Field distributions of (a) SPP, (b) localized SPP and (c) spoof SPP^[65].

Drude 模型中的介电常数实部可以忽略, 金属的行为更接近完美电导体 (perfect electric conductor, PEC). 因此在 SPP 的研究早期, 人们一直认为在低频段不存在 SPP 模式. 但是在本世纪初, Pendry 等^[66] 提出, 在平金属中刻蚀周期性的孔洞能够实现类 SPP 的模式, 称之为仿等离子激元 (spoof plasmons). 实际上, 这些模式主要是由于孔洞内部的腔膜相互作用而产生的, 其色散与 SPP 的色散类似, 场则局域在孔洞内部, 如图 2(c) 所示.

3 等离子激元能带

具有周期性结构的金属能带是由 SPP 与周期性的结构共同作用而产生的. 当 SPP 在周期性的结构中传播时, 由于受到周期性的布拉格散射, 会形成能带结构. 能带与能带之间在一定的条件下将存在带隙. 与电子能带一样, 对于 SPP 能带的理解可以分为能带折叠 (空晶格近似) 和耦合振子 (类紧束缚近似). 其中能带折叠的物理图像如图 3 所示. 在图 3(a) 中, 该周期性 SPP 晶体结构如图 3(a) 插图所示 (折射率为 1.5 的介质层厚为 70 nm、周期为 400 nm、孔直径为 290 nm, 覆盖在厚金属薄膜上)^[63]. 图 3(b) 中的周期性结构为一维银光栅上下表面覆盖介质层的结构 (介质折射率为 2.25、厚度为 600 nm 的介质, 其中银光栅的周期为 600 nm、厚度为 300 nm、空隙的宽度为 15 nm)^[67]. 图 3(a) 和图 3(b) 右图中实线为由时域有限差分法计算的理论能带结构, 虚线是对银表面覆盖的均匀有效折射率介质膜利用空晶格近似进行能带折叠所获得的 SPP 的能带, 即:

$$\mathbf{k}_{\text{SPP}}(\omega) + n\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}'_{\text{SPP}}(\omega), \quad (1)$$

其中 \mathbf{k}_{SPP} 是有效介质模型下的 SPP 波矢, \mathbf{k}'_{SPP} 是折叠后的 SPP 波矢, \mathbf{G}_{ij} 为倒格矢. 图 3 中灰色和白色区域的分界线被称为光线, 即为在介质层上方折射率为 n 的半无限大空间中沿结构界面传播的光的色散:

$$\omega = \frac{c}{n}k. \quad (2)$$

以光线为分界线, 光线以上和光线以下的模式体现了不同的性质, 其在后续部分有详细讨论. 对比空晶格近似和实际情况下的能带结构, 二者的趋势基本吻合. 二者差异主要体现在高频和空晶格近似下的简并态情况. 对于高频部分, 由于波长相较周期性单胞结构的尺寸越来越小, 其越来越能感受到原胞内的具体结构而不仅仅是周期本身. 因此忽略了具体单胞结构的空晶格近似在高频部分失效. 对于空晶格近似的简并态, 其主要发生在周期性结构在倒空间 (也称动量空间) 的高对称点和高对称线上. 由于结构的布拉格散射, 简并态之间会发生耦合, 最终导致了退简并和 SPP 带隙的形成. 同时, 还需要提及的是, 在金属/介质体系的周期性结构中, 不仅具有单纯的 SPP 能带, 还有场集中在介质中的波导模式态, 如图 3(b) 中的蓝线对应能带, 以及 SPP 与波导模式杂化耦合态.

对于金属颗粒阵列的情况, 由于金属纳米颗粒存在的 LSP, 当金属纳米颗粒周期性排列时, 颗粒之间的 LSP 共振会相互作用, 从而产生能带结构. 金属颗粒阵列可以看作耦合的谐振子体系, 当只考虑金属纳米颗粒的电偶极子共振时, 能带可以通过耦合电偶极子方程^[68] 计算得到. 方程的形式如下:

$$P_m = \alpha_m \left[E_m^{\text{ext}} + \sum_{n \neq m} G(m, n) P_n \right], \quad (3)$$

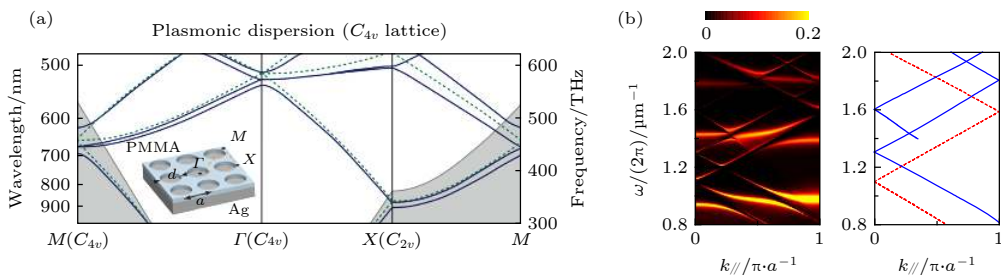


图 3 (a) 金属表面覆盖光子晶体的能带^[63]; (b) 银光栅两侧覆盖介质层的透射光谱 (左) 和对应结构的介质层中的波导模式 (实线) 和银表面的 SPP (虚线) 的折叠能带 (右)^[67]

Fig. 3. (a) Plasmonic band structure of flat metallic substrates coated with two-dimensional dielectric photonic crystal layer^[63]. (b) Left panel: transmission spectra of Ag grating coated symmetrically with dielectric layers; right panel: folded dispersion of guided (solid lines) and SPP (dashed lines) modes of Ag grating coated symmetrically with dielectric layers^[67].

其中, α_m 表示第 m 个金属纳米颗粒的极化率, $\mathbf{G}(m, n)$ 为格林函数. 这里格林函数 $\mathbf{G}(m, n)$ 可以理解第 n 个偶极子的场辐射在第 m 个偶极子处的贡献. 当需要考虑金属纳米颗粒的电四极子、磁偶极子或者更高阶的共振时, 只需要再写出与电偶极子类似的多极子的形式, 并且方程中添加多极子相互作用的项即可. 例如, 当考虑存在电四极子时, 耦合方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_m &= \alpha \left(\mathbf{E}_m^{\text{ext}} + \sum_{n \neq m} \mathbf{G}_{\text{pp}}(m, n) \mathbf{P}_n \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n \neq m} \mathbf{G}_{\text{pQ}}(m, n) \bar{\mathbf{Q}}_n \right), \\ \bar{\mathbf{Q}}_m &= \beta \left(\text{sym}(\nabla \mathbf{E}_m^{\text{ext}}) + \sum_{n \neq m} \mathbf{G}_{\text{Qp}}(m, n) \mathbf{P}_n \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n \neq m} \mathbf{G}_{\text{QQ}}(m, n) \bar{\mathbf{Q}}_n \right), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 α, β 分别为金属纳米颗粒的电偶极子的极化率和电四极子的极化率, 这里的格林函数 $\mathbf{G}(m, n)$ 的下标 pp, QQ, pQ 和 Qp 分别表示不同位置的偶极偶极、四极四极和偶极四极之间的相互作用. $\bar{\mathbf{Q}}$ 表示电四极子的 5 个独立分量包括 $-Q_{xx}/2, (Q_{yy} - Q_{zz})/2, Q_{xy}, Q_{xz}, Q_{yz}$. $\text{sym}(\nabla \mathbf{E}_m^{\text{ext}})$ 表示先对入射电场取梯度再对此二阶张量进行对称化, 然后取出其中 5 个独立分量. 图 4 即为通过耦合多极子方程计算得到金属纳米颗粒链的能带 [69], 其中上面一支是由电四极子相互作用产生的能带, 下面一支则是由电偶极子相互作用产生的能带. 由于金属纳米

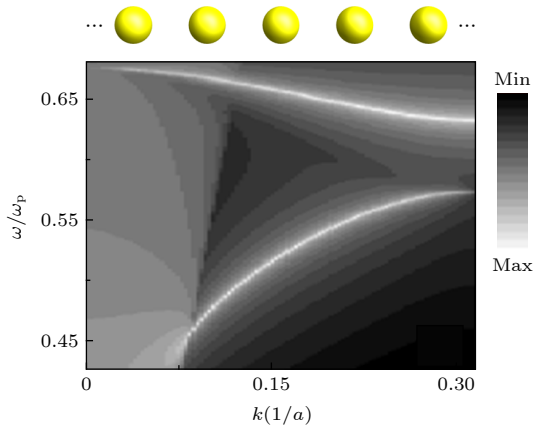


图 4 金属纳米颗粒链的能带 [69]

Fig. 4. Band structure of metal nanoparticle chain [69].

颗粒内部的电偶极子与电四极子存在相互作用, 这两条能带具有反交叉的性质. 并且这种金属颗粒的电四极子相互作用产生的能带具有本征的负群速度 [70].

3.1 能带在光线以上的性质

与电子体系中的布里渊区不同, 如前所述, SPP 系统 (也适用于其他光子体系) 的布里渊区可以被光线划分为两个区域, 分别是光线以上和光线以下. 光线以上的能带又分为两种: 一种在真空光线 $k = \omega/c$ 以上; 另外一种当折射率为 n 的介质覆盖在系统表面时, 能带在介质光线 $k = n\omega/c$ 以上, 但在真空光线之下. 在真空光线以上的能带中的模式的波矢能够与真空中的波矢匹配, 因此其能够泄漏到自由空间中, 这些模式被称为漏波模式 (leaky mode). 利用这些漏波模式, 人们可以在很大自由度上实现 SPP 模式的耦合与操控. 对于这些漏波模式, 即使不考虑金属内部的本征损耗, 由于辐射损耗的存在, 模式的频率或者波矢也是一个实部和虚部都不为零的复数. 反映在能带上, 如图 5(a) 所示, 其实际的能带不再是由曲线构成, 而是具有一定的宽度 [62,63]. 其中, 模式本征频率的虚部对应于能带在频率轴上的展宽, 如红色线段所示. 考虑频域与时域的对对应关系, 频域上的展宽对应于模式的振幅在时域上的衰减. 同理, 能带在波矢轴上的展宽, 如蓝色线段所示, 对应于模式波矢的虚部, 反映了模式在空间上的传播距离. 从频域和时域角度, 这些漏波模式就像是一个谐振腔, 具有可以严格定义的品质因子 (Q factor). 从空间传播的角度, 这些 SPP 漏波模式的辐射场具有一定的空间相干性, 如图 5(b) 所示 [62,63]. 其相干性可以被双缝干涉的干涉条纹验证, 相干程度也可由干涉条纹的明暗对比所反映. 利用 SPP 能带中的漏波模式的高品质因子和辐射场的空间相干性好的特性, SPP 晶体结构已经广泛地被应用于光-物质强耦合、定向辐射、激射和光传感器等方面. 对于被介质覆盖的金属系统来说, 虽然 SPP 的色散始终在介质光线以下. 但是当系统被周期性结构调制, 能带发生折叠, SPP 能带的一部分会出现在介质光线以上、真空光线以下. 这一部分能带上的模式能够与介质中的波导模式耦合, 使得透射增强 [67]. 在图 3(b) 右图中, 给出了银光栅两侧覆盖 600 nm 厚的介质层的 SPP 能带, 其中实线为介质层中的

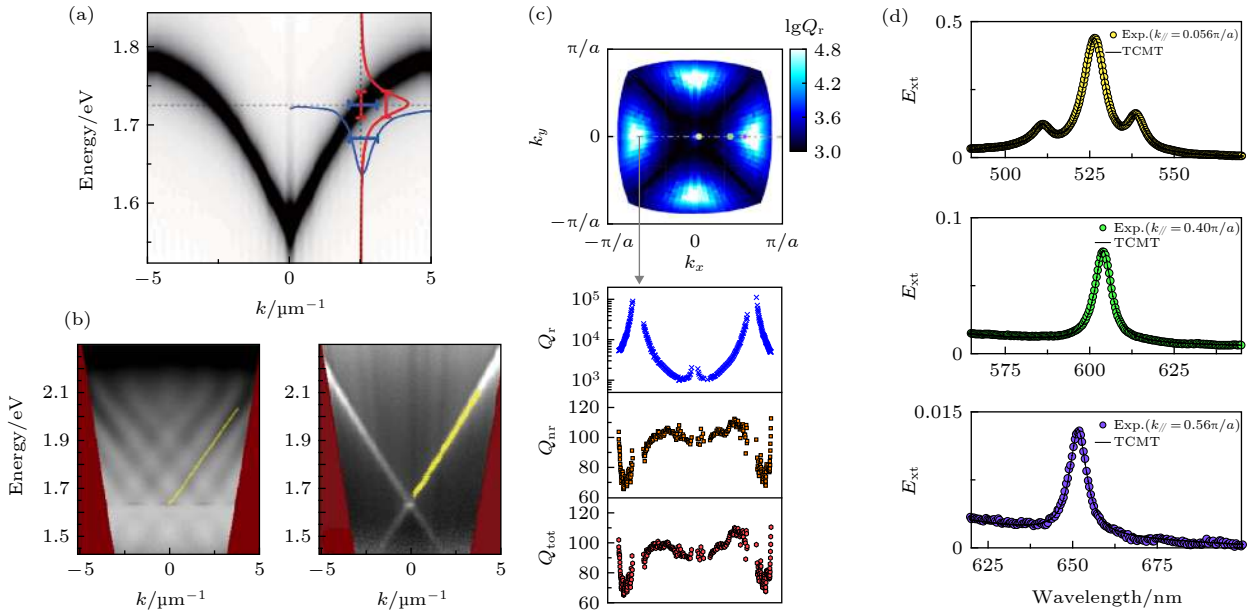

 图 5 光线以上能带的性质包括连续体中的束缚态、时间相干性和空间相干性^[62,63]

 Fig. 5. Properties of band which inside light cone including BIC, time and spatial coherence^[62,63].

波导模, 虚线为银光栅和介质之间的 SPP 折叠能带. SPP 能带经过折叠后与介质中的波导模交叠, 即此时两种模式的波矢匹配, 模式之间发生耦合. 反映到图 3(b) 左图的透射图中, 可以明显地观察到在两种模式色散交叉的频率处, 透射强度有明显增强. 最后, 需要注意的是, 如果在 SPP 模式的两侧覆盖厚金属, 由于金属的限制, 光线以上的态也不能向外泄漏, 此时系统更接近于二维体系. 同时表面等离极化激元模式也可以与金属边界内的腔模耦合, 形成较为复杂的杂化模式^[71].

最近, 在光线以上的漏波模式中, 一些辐射品质因子趋近于无限大的模式 (如图 5(c) 和图 5(d) 所示^[62,63]) 越来越受到关注. 由于落在光线以上的漏播模式能够与自由空间的某些传播模式满足波矢匹配条件, 它们的频率必然落入自由空间连续谱范围之内, 其原本是可以, 如上所述, 辐射到远场的. 但其品质因子发散, 意味着这些处于自由空间连续谱范围内的模式被束缚在周期性结构的近场范围, 从而该模式的辐射为 0. 由于这些模式的反常性质, 被称为连续谱中的束缚态 (bound state in the continuum, BIC)^[72]. BIC 在很多物理系统中都能被找到, 例如光子系统^[73–76]、声学系统^[77,78]、甚至在水波^[79]中. BIC 具有无穷大的 Q 因子, 这使得很多应用成为可能^[80–82], 包括 SPP 激射和矢量光发射等.

对于 BIC 的成因, 当前主要有三类相互自治

的解释. 第一类解释主要针对布里渊区中具有旋转对称性的高对称点^[83–85], 例如布里渊区中心的 Γ 点. 在 Γ 点, SPP 晶体的本征模式具有在旋转操作下的 +1 (对称) 和 -1 (反对称) 本征值. 其中的 +1 本征值对称情况由于与自由空间的对称性不匹配, 因此会出现无法辐射的 BIC 模式. 随着最近非 Γ 点 BIC 的情况越来越多的被发现 (如图 5(c) 和图 5(d) 所示), 第二类基于结构内部多种模式的互相干涉导致总的辐射场的相干相消的机制被广泛的研究^[73–75,86,87]. 除了上面两类解释以外, 第三类基于动量空间 (波矢空间) 的拓扑性的偏振涡旋^[88–90] 解释 BIC 的成因是这三类解释中最形象直观的. 对于光线以上的漏波模式, 其远场部分对应于辐射到环境介质中的平面波. 光波在自由空间的横波条件要求在远场下, 平面波必须具有确定的偏振态. 当将这些漏波模式在远场的偏振态投影到动量空间时, 远场偏振态在第一布里渊区中就构成了一个二维的矢量场. 对于任意一个矢量场, 其一个最值得关注的特征就是在矢量场中是否存在场的奇点. 如果存在奇点, 该奇点的邻域偏振场就构成了矢量场的涡旋结构. 在涡旋的中心, 偏振态无法定义, 也就意味着, 该模式在远场无法满足光波的横波条件, 从而对应上述的 BIC. 为了基于动量空间偏振场的拓扑奇点描述 BIC, 引入了“拓扑荷”的定义, 即偏振态 (一般为椭圆偏振) 的长轴对于奇点的绕数. 对于二维系统来说, 当研究问题限定

在第一布里渊区时, 根据第一布里渊区的环面 (torus) 的整体拓扑特性, 所有的奇点, 或者所有的 BIC, 应满足整个第一布里渊区的“拓扑荷”的求和等于二维布里渊区环的欧拉示性数 $\chi = 0$. 如图 6(a) 所示, 其为模拟计算得到的图 3(a) 中第二条能带上各模式远场辐射的偏振, 实线表示不同的偏振方向, 蓝色和红色的点分别表示“拓扑荷”为 +1 和 -1 的核, 灰色的区域为不辐射的态. 因此, 可以预测图中灰色的区域的“拓扑荷”为 -3. 图 6(b) 和图 6(c) 分别为 Zhang 等^[63] 通过研制的偏振分辨动量空间成像光谱仪实验测得的远场辐射的偏振态和其主轴角度在平金属覆盖介质光栅体系中的第一布里渊区中的分布. 动量空间中的偏振场不仅有效地解释了 BIC 的成因, 而且还揭示了隐藏在 SPP 能带结构中的新的自由度——偏振态. 基于偏振态这个新的自由度, 研究者能够将奇点光学、拓扑光学与 SPP 晶体的辐射共振态中的偏振场建立起了联系. 通过对动量空间偏振场加以一些独特的调控, 可能会产生出新奇的辐射效应和面内传输效应.

3.2 能带在光线以下的性质

能带在光线以下的部分, 由于其模式无法辐射到真空中, 其模式天然的适合导波^[91,92]. 例如, Maier 等^[93] 基于金属纳米颗粒链在光线以下的能带的模式在实验上实现了在衍射极限以下的电磁波的传输 (图 7(a)). 这种波导的尺寸为亚波长, 对于在纳米尺度上的光学器件实现光与物质的相互作用来说至关重要. 例如, Li 等^[94] 提出了利用这种波导作为纳米透镜进行聚焦的可能性. 但是由于这种波导模式发生在金属的等离子共振频率处, 金属的内禀损耗则大大降低了模式的传输距离, 限制了这种波导的应用. 除了通带里面的传导模式,

具有完全禁带的 SPP 结构对于光学器件来说同样重要. Wu 等^[95] 在平金属表面覆盖二维的周期性排列的介质柱实现 SPP 的全禁带. 基于这种 SPP 全禁带, 可以实现对通信波段的电磁波传输的调控. 负折射是最近十几年研究的一个热点, 从微波波段到红外波段的负折射率材料一般是由开口谐振环组成的. 但是到了光频段, 开口谐振环无法再支持强烈的磁共振. 通过设计六角晶体摆放的同轴金属-介质-金属波导结构可以实现在光频段的负折射 (图 7(d))^[96], 这种结构并不需要特殊的偏振和角度激发, 且相比于多层“渔网结构”更加容易制备. 拓扑是最近研究的另一个热点. 使用金属纳米颗粒, 将其在平面内摆放成六角晶格的结构, 则能够在等离子能带中实现 Dirac 点 (图 7(c))^[97,98]. 不同于石墨烯和二维光子晶体中的 Dirac 点, 在等离子能带中的 Dirac 点不仅能够支持标量波还能够矢量波. 同时, 等离子能带中的 Dirac 点产生的边界态的一些行为也完全不同于石墨烯^[97]. 在微波波段, 利用局域 spoof SPP, 打破结构单元的镜面对称, 则能够实现“谷”极化的拓扑边界态 (图 7(e))^[46]. 最后介绍一种在微波波段工作的 spoof SPP 波导, 这种波导的能带同样在光线以下. 上文中提到的 spoof SPP 因其结构厚度大且加工不易, 限制了它在实际中的应用. 实际上, 具有锯齿结构的金属薄膜也可以支持 spoof SPP, 其结构如图 7(f) 中的插图. 金属薄膜的厚度越小, 其模式的色散越往蓝移, 也即模式局域性更高^[99]. 这种 spoof SPP 的能带受结构的影响很大, 可以通过改变锯齿的形状、深度有效的调节其能带^[100,101]. 由超薄金属构成的 spoof SPP 波导的能带同样在真空光线以下, 并不与真空中的电磁波相互作用, 因此具有很强的抗干扰性. 其次场分布相比于三维的人工表面等离子极化激元具有更加高度的局域性, 在

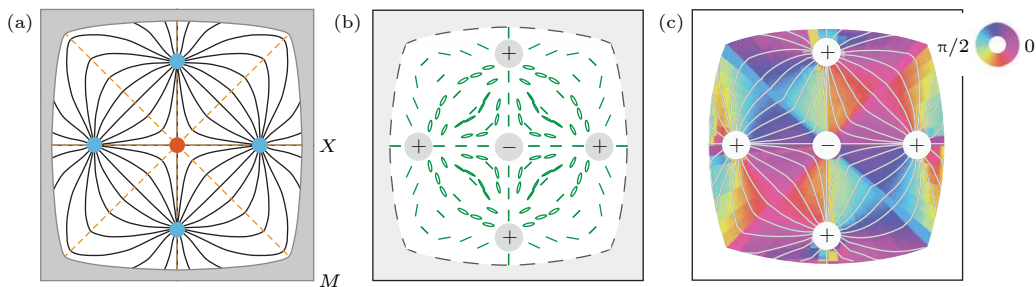


图 6 连续体中的束缚态的拓扑解释^[63]

Fig. 6. Topological nature of BICs^[63].

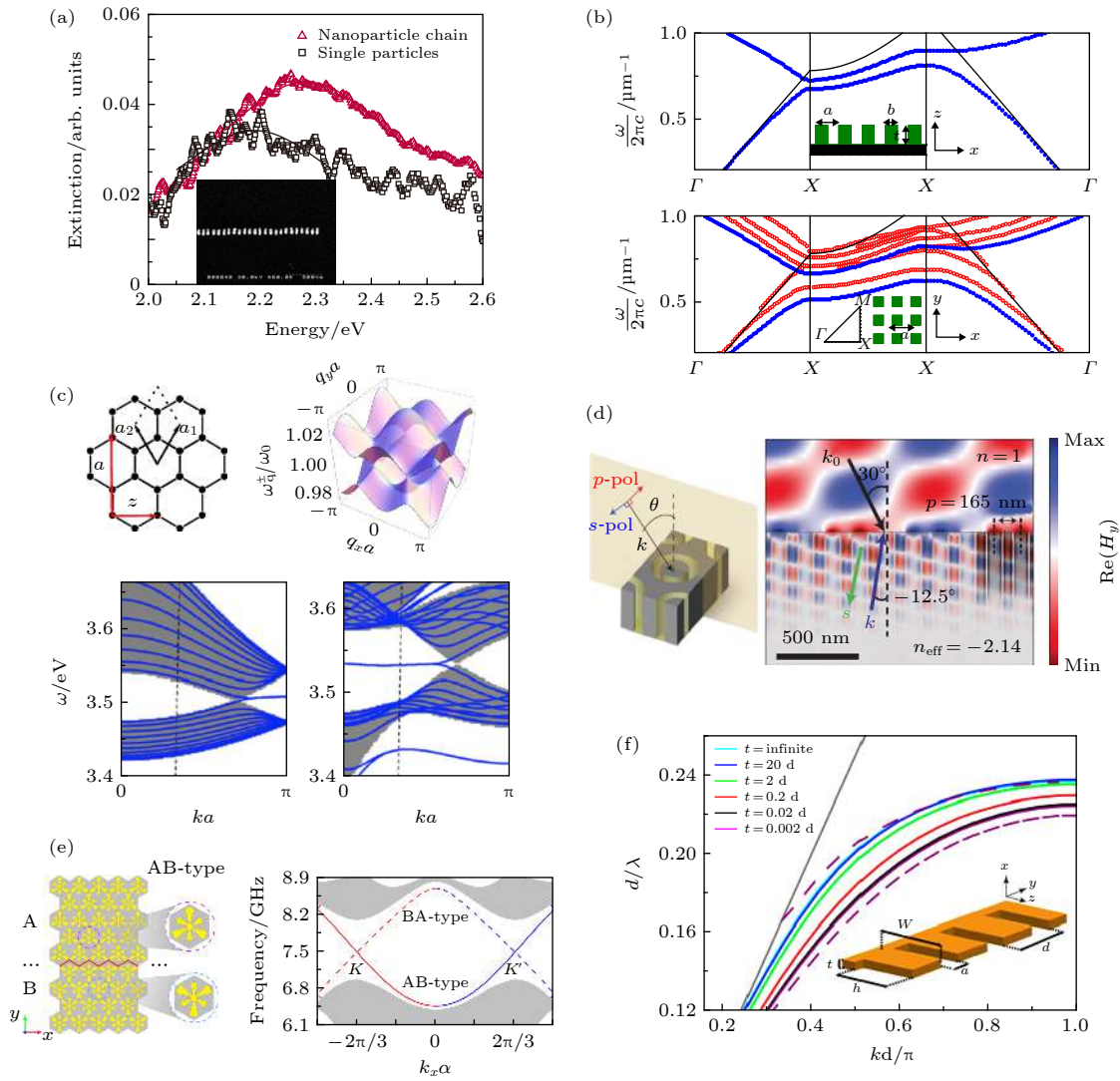


图 7 等离激元能带在光线以下的一些性质 (a) 导波^[93]; (b) 全禁带^[95]; (c) 狄拉克点^[97,98]; (d) 负折射^[96]; (e) 拓扑边界态^[46]; (f) spoof SPP 波导^[99]
 Fig. 7. Properties of plasmonic bands inside the light cone: (a) Wave guiding^[93]; (b) complete band gap^[95]; (c) Dirac point^[97,98]; (d) negative refraction^[96]; (e) topological edge state^[46]; (f) spoof SPP waveguide^[99].

传输电磁波过程中能够更加有效地避免串扰. 同时由于其结构超薄、具有柔性、便于制造, 因此可以被设计成集成光路中的各类功能器件中, 例如环形谐振器、功分器^[102,103]等. 在未来, 这种 spoof SPP 波导在通信、集成光路等可能有更广泛的应用.

4 等离激元的应用

2006 年, Bravo 等^[104]通过在金属膜上刻蚀周期性的亚波长孔洞实现了光的异常透射(图 8(a)). 这种光的异常透射实际上就是由于入射光通过周期性孔洞提供的倒格矢与金属的 SPP 相互作用产生的. 对于单个亚波长孔洞来说, 其透射的光在

远场的分布是比较弥散. 为了得到较为汇聚的透射光, 研究人员设计了一种牛眼结构即在上述亚波长孔洞的周围周期性的刻蚀多圈同心圆环凹槽(图 8(b))^[105]. 这种牛眼结构由于入射光通过周期性凹槽提供的倒格矢与金属的 SPP 耦合, 得到了上述类似的超强透射的现象, 从而实现窄带滤波的功能. 金属纳米阵列同样有很多应用, 例如, Zhu 等^[106]通过控制激光照射时间的长短, 得到尺寸不一的金属纳米结构. 因不同尺寸的金属纳米结构具有不同的颜色, 从而实现了全色彩的激光打印. 这种基于金属纳米结构的产生颜色能够有效的减少像素面积、并且颜色明亮、永不褪色, 如图 8(c) 所示. 周期性排列的金属纳米阵列常常被用来作为

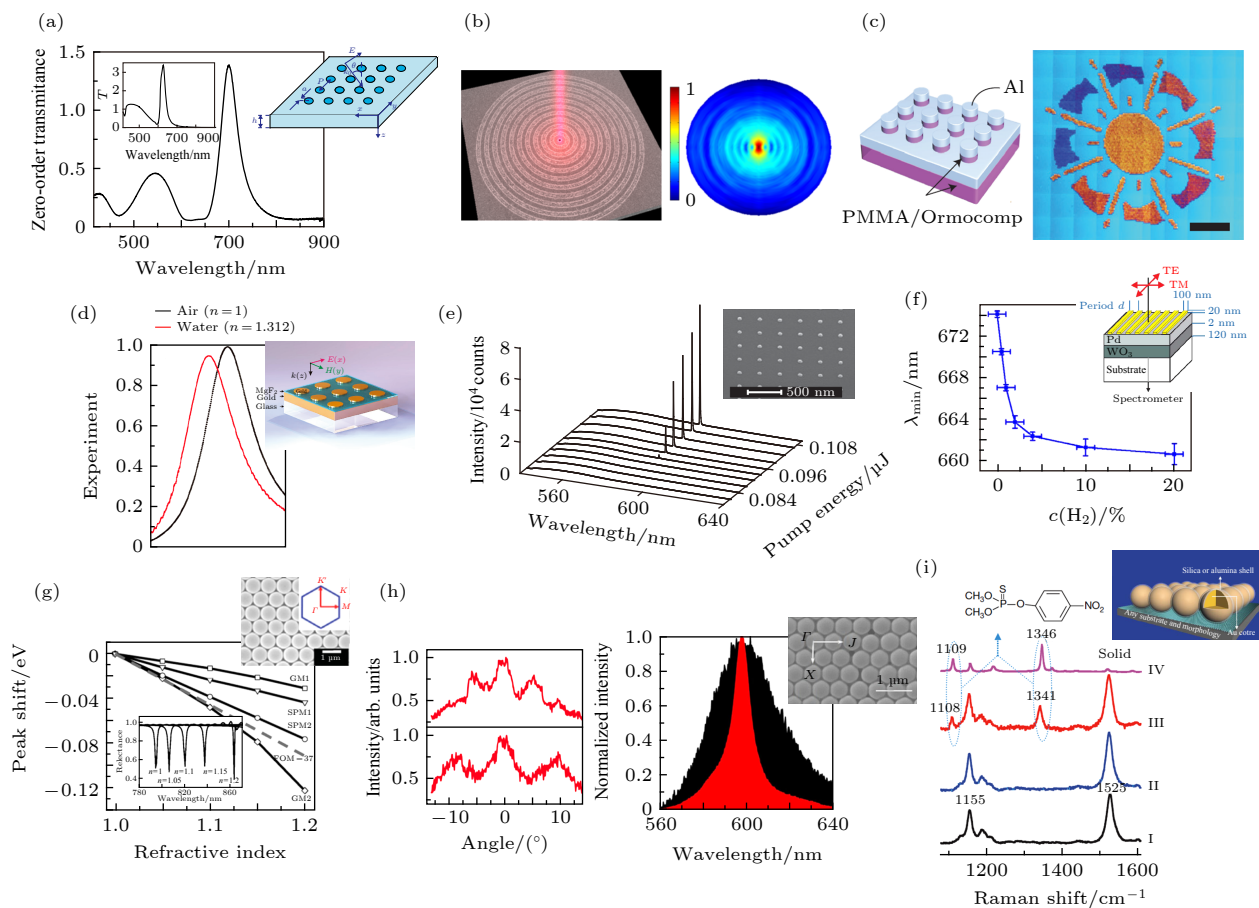


图 8 等离激元的一些应用 (a) 光学异常透射^[104]; (b) 利用“牛眼”结构实现光的汇聚^[105]; (c) 结构色^[106]; (d) 红外光的完美吸收器^[108]; (e) 以银颗粒阵列为基底的分布式激光器^[110]; (f) 基于金属棒阵列的氢气浓度探测器^[112]; (g) 基于混合光子与等离激元晶体的传感器^[64]; (h) 基于混合光子与等离激元晶体的荧光相干辐射^[113]; (i) 利用金属颗粒增强拉曼光谱^[114]

Fig. 8. Applications of plasmonics: (a) Extraordinary optical transmission^[104]; (b) beaming light with a bull's eye structure^[105]; (c) structural colors^[106]; (d) infrared perfect absorber^[108]; (e) distributed feedback laser based on silver particle array^[110]; (f) hydrogen sensor based on metallic photonic crystal slabs^[112]; (g) sensor based on hybrid plasmonic-photonic crystal^[64]; (h) coherent fluorescence emission by hybrid photonic-plasmonic crystals^[113]; (i) enhance Raman spectroscopy by using metal nanoparticles^[114].

完美吸收器^[107], Liu 等^[108]通过将纳米金圆盘周期性摆放在近红外波段实现了完美吸收(图 8(d)), 完美吸收器在等离激元传感器上具有一定的应用, 例如用来探测等离激元共振^[109]. 此外, 不仅可以利用金属的 SPP 的效应制备激光器^[19], 金属纳米阵列也能够作为分布式激光器的基底(图 8(e))^[110,111]制备激光器. 相较于传统的介质光栅基底的激光器, 使用金属纳米阵列的分布式激光器的阈值并不会提高太多, 并且其结构更加小巧. Nau 等^[112]则将金属纳米阵列与钨酸酐(WO_3)结合设计了一种氢气传感器(图 8(f)). 这种传感器的原理在于金属棒阵列下方的钨酸酐在不同氢气浓度下折射率的不同, 当钨酸酐的折射率改变时, 其上方的金属棒阵列的共振也会受到影响, 从而从透射光共振峰位的移动测得氢气的浓度. 在金属表面覆盖介质小球

的结构同样具有很多应用, 例如 Yu 等^[64]通过在平坦的金表面自组装聚苯乙烯小球晶体, 在实验上实现了强烈的混合等离激元-光子晶体的共振模式, 这种模式的 Q 因子远高于普通的 SPP, 且对环境非常敏感(图 8(g)), 非常适合作为传感器. Shi 等^[113]则通过类似的混合等离激元-光子晶体结构实现了相干荧光辐射, 相比于单纯的贵金属, 其辐射光具有更好的定向性(图 8(h)). 金属纳米小球还有一种最典型的应用, 即表面增强拉曼光谱. 例如, Li 等^[114]利用金属纳米颗粒增强拉曼光谱检测橘子表皮残余的甲基对硫磷分子(图 8(i)).

5 二维材料的等离激元

石墨烯因其优异的光学、电学性质在最近十几

年受到广泛的研究^[115]. 类似于贵金属, 石墨烯内部同样存在等离激元模式, 所以可以类比金属, 设计石墨烯等离激元的能带结构. 与金属中的等离激元共振不同的是, 石墨烯的等离激元共振频率与费米能级 (E_F) 相关, 其费米能级可以通过电或化学掺杂进行调节, 因此等离激元共振频率可以从太赫兹变化到中红外波段, 大大增加了石墨烯等离激元应用的可能性. 随着纳米加工技术的发展, 越来越多的二维材料被制备、研究, 其中很多都展现了类似石墨烯的等离激元性质. 例如, 以二硫化钼 (MoS_2) 为代表的过渡金属硫化物作为单层材料时, 虽然与石墨烯相同均为六角晶格的结构. 但是, 其结构并没有空间反演对称性, 能带天然直接具备带隙^[116]. 因此, 不同于石墨烯, 二硫化钼的等离激元性质受体系内的自旋轨道相互作用调控. 这些过渡金属硫化物作为具有直接带隙的半导体与金属的等离激元的复合体系已被大量研究^[117]. 例如, 利用二硫化钼与 SPP 结构的复合体系能够有效地提高二硫化钼的量子效率的这个特点, 这种复合体系被用来增强拉曼散射^[118]、荧光增强^[119]、增强光电流^[120]等. 另外一种半导体二维材料——黑磷 (black phosphorus), 则由其自身的各向异性结构而导致电子能带的各向异性在等离激元研究领域备受关注. 因电子能带的各向异性, 黑磷的等离激元的色散也具有各向异性. 黑磷的另外一个特点是通过改变应力^[121,122]或掺杂^[123]来施加法向的静电场来调控等离激元共振, 为调控等离激元开启一个新的维度, 这也为实现各向异性等离激元设备提供了可能^[124]. 上述的新型的二维材料都具有一些非常新颖、奇特的等离激元特性, 但本文的重点在于等离激元的能带结构, 而这些二维材料周期性结构的能带研究还较为缺乏, 因此下文主要介绍石墨烯的等离激元能带与应用.

5.1 石墨烯等离激元能带

石墨烯与介质表面也存在 SPP 共振. 不同于金属与介质表面产生的 SPP, 石墨烯只有一层原子的厚度, 所以上下表面都会产生表面等离激元共振, 通过石墨烯的介电常数公式结合边界条件与麦克斯韦方程组可计算出其 TM 模的色散的公式为

$$\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{Q^2 - \varepsilon_1 \Omega^2}} + \frac{\varepsilon_2}{\sqrt{Q^2 - \varepsilon_2 \Omega^2}} = -\frac{i\sigma/(\varepsilon_0 c)}{\Omega}, \quad (5)$$

其中, $Q \equiv \hbar c q / \mu$ 和 $\Omega \equiv \hbar \omega / \mu$ 分别为约化后的波矢和频率, μ 为化学势. 当 $q \gg \omega / c$ 时, 色散公式可以简化为: $Q = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{\Omega \varepsilon_0 c}{i\sigma}$. 图 9(a) 给出了石墨烯覆盖在不同介电常数的材料上的 SPP 的色散^[125]. 当单层石墨烯周期性排列时, 可以计算出其 TM 模的能带的公式为: $\cos(k_x a) = \cos(qa) - \frac{i\sigma q}{2\omega \varepsilon_0 \varepsilon} \sin(qa)$, 如图 9(c) 所示^[126]. 这种结构有非常强的非局部效应, 即其有效介电常数具有洛伦兹线型. 类似于金属薄膜刻蚀周期性孔洞, 在石墨烯上刻蚀周期性的孔洞也能够得到特定的等离激元能带结构^[127]. 最近, 基于石墨烯的光子拓扑绝缘体也得到了一定的研究. 例如, Zhang 课题组^[128]通过在石墨烯上刻蚀六角晶格的孔洞在能带上得到了 Dirac 锥, 而后再施加静磁场打开 Dirac 锥, 在红外波段实现了基于石墨烯 SPP 的具有单向性的边界态 (图 9(e)). 对于在一个方向上为有限尺寸的石墨烯条来说, 其具有两种等离激元模式. 一种模式的场集中在石墨烯的中间, 另一种模式的场局域在石墨烯的边界, 其色散如图 9(b) 所示^[129]. 将这种石墨烯条在横向或纵向的周期性排列都能够得到一定的能带结构 (图 9(d))^[130]. 最后, 还可以通过将石墨烯放置在亚波长结构的介质光栅来实现对等离激元色散的调控^[125,131], 如图 9(f) 所示.

5.2 石墨烯等离激元的应用

对于石墨烯等离激元的色散的调控存在很多可能的应用^[132]. 例如, Zhao 等^[133]设计了一种基于石墨烯等离激元的太赫兹切伦科夫辐射的结构 (图 10(a)). 其基本过程为: 首先使用电子束激发石墨烯的 SPP, 而后 SPP 经过略微的衰减穿过缓冲层达到缓冲层与基板的界面, 最后转化为基底中的切伦科夫辐射. 主要原理在于, 利用缓冲层使石墨烯 SPP 的色散蓝移以越过在基底中的光线, 只要缓冲层的厚度小于石墨烯在垂直方向上的衰减长度, 在基底中的光线以上的石墨烯的 SPP 就越过缓冲层转化为基底中的切伦科夫辐射 (如图 10(a) 下部所示). 相比于金属圆盘, 石墨烯圆盘具有更强的 LSP, 将石墨烯圆盘周期性地摆放^[134,135], 利用其强烈的 LSP 了同样可实现完美吸收 (图 10(b)). 石墨烯等离激元的可调性也存在一定的应用, 例如 Lu 等^[136]将石墨烯覆盖在齿深逐渐增大的介质光栅上实现了石墨烯等离激元的慢光效应, 并且通

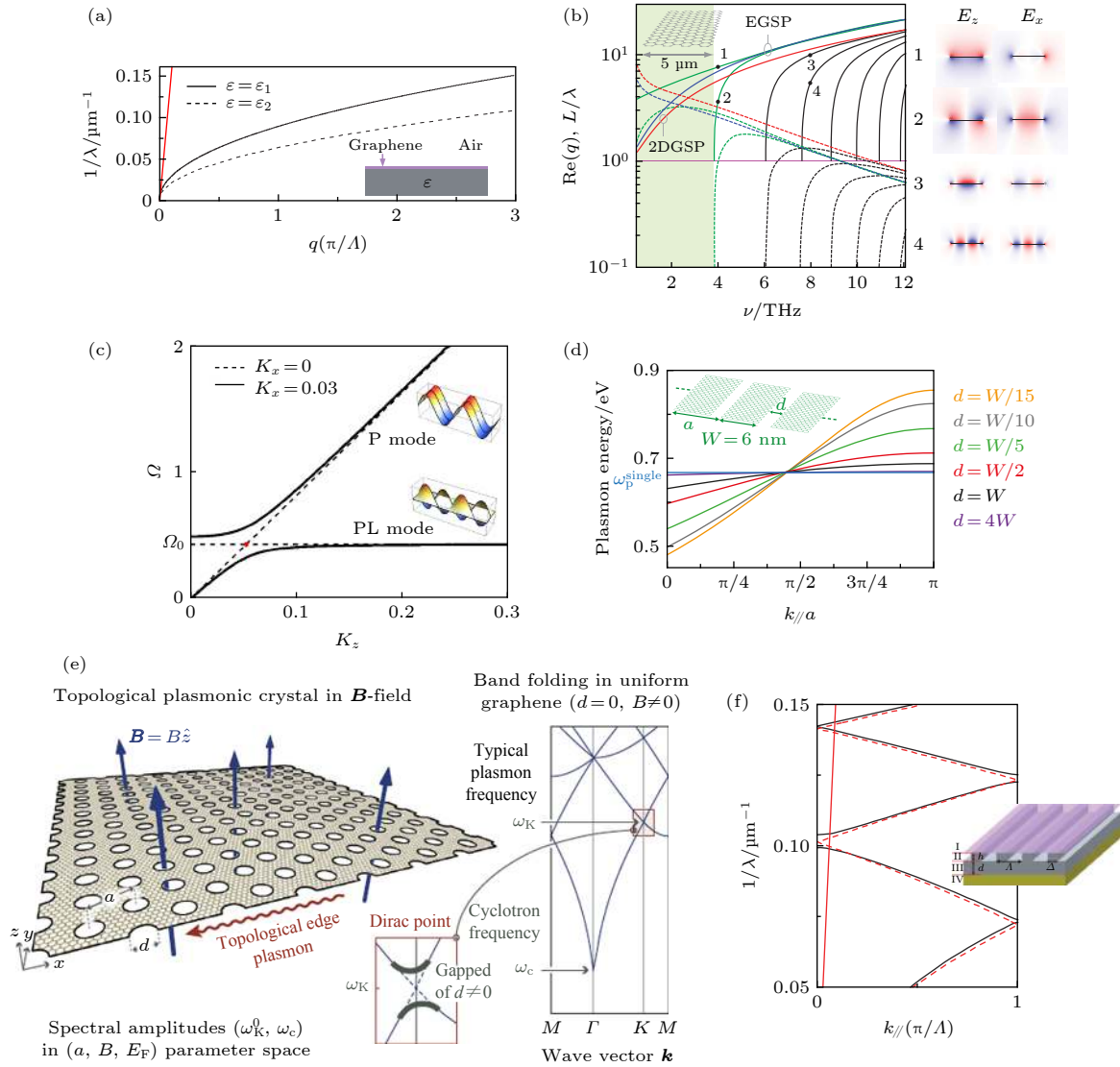


图 9 (a) 石墨烯等离激元色散^[125]; (b) 石墨烯条的等离激元色散^[129]; (c) 单层石墨烯周期性排布 TM 模式的能带^[126]; (d) 石墨烯条周期性排布的能带^[130]; (e) 石墨烯刻蚀六角晶格孔洞的能带^[128]; (f) 石墨烯覆盖在一维介质光栅上的能带^[125]

Fig. 9. (a) Dispersion of graphene-based plasmons^[125]; (b) dispersion of graphene ribbon based plasmons^[129]; (c) TM band structure for monolayer graphene sheet array^[126]; (d) band structure for graphene ribbon array^[130]; (e) band structure for graphene-based plasmonic crystal^[128]; (f) band structure for one-dimensional dielectric grating coated with monolayer graphene sheet^[125].

过改变石墨烯电压控制光的释放与束缚 (图 10(c)). Wang 等^[137] 则通过利用周期性排列的多层石墨烯之间的 SPP 的耦合实现了光的分束与定向传播 (图 10(d)).

6 展望与结束语

最后, 本文简要讨论一下 SPP 及其能带调控研究中的几个尚存问题, 不能概括全貌, 希望抛砖引玉, 以期推动该领域的发展.

1) 支持 SPP 的导体材料由于其具有自由电子, 实际上应具有很强的非线性系数. 但对于无

结构的平导体材料, 其在光波段的负介电常数导致电磁波无法深入穿透样品, 因此实际的非线性效应很小. 由于 SPP 的强场强效应, 具有 SPP 模式的材料理应能够极大地增强光与物质的非线性相互作用^[138,139]. 不过, 需要注意的是, 高效率的非线性过程不仅与场强相关, 而且也需要满足相位匹配条件^[140]. 考虑到 SPP 本身能带的强色散特性, 绝大部分报道的与 SPP 有关的非线性工作是基于 LSP 的^[138,141]. 为了在长的作用距离上能够实现高效的非线性转换, SPP 的能带结构设计就显得尤其重要. 如能再结合当前光子晶体中近零折射率等概念, 使相位匹配设计简化, 基于 SPP 的片上高效非

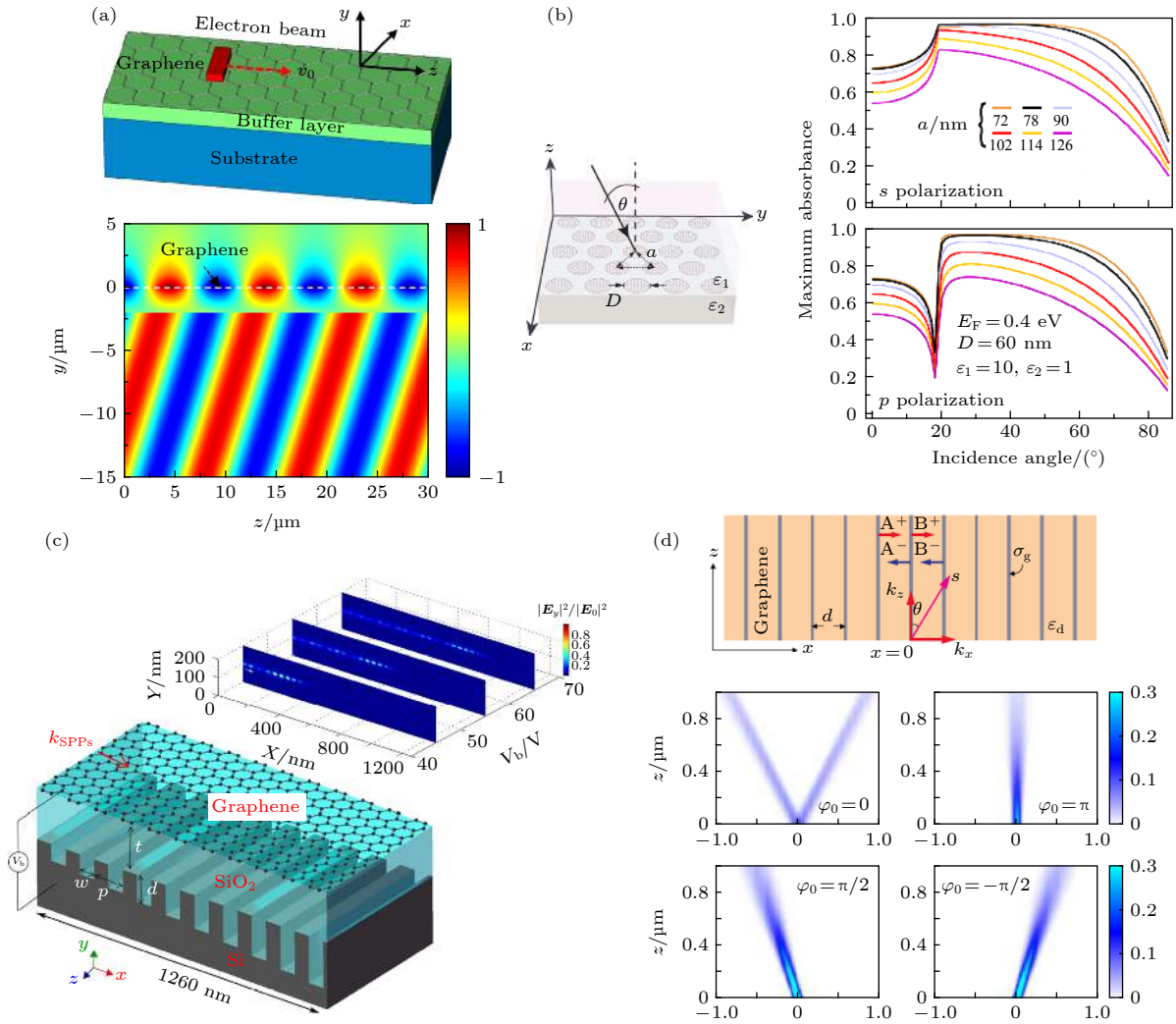


图 10 石墨烯的一些应用 (a) 基于石墨烯 SPP 的太赫兹切伦科夫辐射^[133]; (b) 基于周期性摆放的石墨烯圆盘的宽角度的全吸收^[134]; (c) 在槽深逐渐变化的介质光栅上覆盖石墨烯, 实现光在特定位置的束缚与释放^[136]; (d) 利用周期性摆放的石墨烯实现光的分束与定向辐射^[137]

Fig. 10. Applications of graphene-based plasmonic: (a) Cherenkov terahertz radiation via graphene plasmons^[133]; (b) complete absorption by periodic array of graphene nanodisks^[134]; (c) slow and release light based on graphene plasmons^[136]; (d) beam splitting and direction control of light based on monolayer graphene sheet array^[137].

线性操控有可能成为未来片上光学和片上光计算的重要组成部分。

2) 利用 SPP 实现材料的激射, 一直都是领域中的重要发展方向. 在其中, 由于具有能带结构的 SPP 模式具有高品质因子和长程的空间相干性, 周期性金属颗粒阵列结构最近被广泛地报道其有利于实现物质的激射^[142,143]. 尽管如此, 可实现激射的物质绝大多数均分散在溶液环境中, 极大地限制了这类 SPP 激光的应用范围. 如何有效地实现基于 SPP 的固态物质激射, 甚至电注入下激射是 SPP 研究领域中的一个关键问题. 这个问题的回答不仅依赖于研究人员对 SPP 的能量耗散机

制^[144,145] 和 SPP 与物质相互作用机制^[146] 更深刻的理解, 而且也与金属等材料的微加工工艺的提升密切相关. 如何能够在适合现有发光光电半导体的工艺制程中大面积的加工金属结构? 如何在不破坏原有固态材料本身内量子效率的情况下, 实现在发生电荷转移和跃迁的关键位置加工金属结构? 如何能够使提供 SPP 局域强场的金属结构不成为激射材料或者发光器件中电子的捕获体或“陷阱”? 这些制造工艺问题仍有待于深入的研究.

3) 无论上述的非线性过程或光抽运下的激射应用, 均需要强功率的入射激光. 由于金属材料在光频段的强吸收特性, 热效应对器件的损伤极大.

如果通过传统的导热材料导出热量, 在实际的 SPP 能带结构的设计中有必要考虑这方面的具体影响.

4) 最后, SPP 作为一个与实际联系紧密的应用物理研究方向, 其设计有必要具有一定的范式. 该范式需满足工业根据具体目标效能构筑 SPP 结构的需求. 这有赖于多物理场与光场耦合的模拟手段有效配合遗传和粒子群等的优化算法. 同时, 在算法中引入能够积累设计经验的人工智能甚至无监督人工智能算法也可以进一步加速设计.

本文主要讨论了金属和石墨烯等离激元的能带, 介绍了产生等离激元能带的微结构、能带的产生机制, 能带在光线以上和光线以下的各种性质. 基于等离激元能带上的各类性质, 等离激元在波导、传感器、光的定向辐射等方面显示了一定的应用. 随着人们对等离激元能带的深入研究, 有望推动等离激元在广泛的领域有更多的应用.

参考文献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [2] Ruan Z, Qiu M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 233901
- [3] Anker J N, Hall W P, Lyandres O, Shah N C, Zhao J, Van Duyne R P 2008 *Nat. Mater.* **7** 442
- [4] Tittl A, Giessen H, Liu N 2014 *Nanophotonics* **3** 3
- [5] Tong L W, Wei Hong, Zhang S P, Xu H X 2014 *Sensors* **14** 7959
- [6] Shen Y, Zhou J, Liu T, Tao Y, Jiang R, Liu M, Xiao G, Zhu J, Zhou Z K, Wang X, Jin C, Wang J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2381
- [7] Yang W H, Zhang C, Sun S, Jing J, Song Q, Xiao S 2017 *Nanoscale* **9** 8907
- [8] Dorfmüller J, Vogelgesang R, Khunsin W, Rockstuhl C, Etrich C, Kern K 2010 *Nano Lett.* **10** 3596
- [9] Chen X W, Agio M, Sandoghdar V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 233001
- [10] Liu W, Miroshnichenko A E, Neshev D N, Kivshar Y S 2012 *ACS Nano* **6** 5489
- [11] Alonso-González P, Albella P, Neubrech F, Huck C, Chen J, Golmar F, Casanova F, Hueso L E, Pucci A, Aizpurua J, Hillenbrand R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 203902
- [12] He X, Tang J, Hu H, Shi J, Guan Z, Zhang S, Xu H 2019 *ACS Nano* **13** 14041
- [13] Zhang X, Liu Z 2008 *Nat. Mater.* **7** 435
- [14] Kneipp K, Wang Y, Kneipp H, Perelman L T, Itzkan I, Dasari R, Feld M S 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1667
- [15] Nie S M, Emery S R 1997 *Science* **275** 1102
- [16] Zhang W, Cui, Yeo B S, Schmid T, Hafner C, Zenobi R 2007 *Nano Lett.* **7** 1401
- [17] Wang X, Zhu X, Chen Y, Zheng M, Xiang Q, Tang Z, Zhang G, Duan H 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 31102
- [18] Yang X, Sun Z, Low T, Hu H, Guo X, García de Abajo F J, Avouris P, Dai Q 2018 *Adv. Mater.* **30** 1704896
- [19] Ma R M, Oulton R F, Sorger V J, Zhang X 2013 *Laser Photonics Rev.* **7** 1
- [20] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, Bao Q L, Loh K P, Lin B, Tjin S C 2010 *Laser Phys. Lett.* **7** 591
- [21] Bai B, Svirko Y, Turunen J, Vallius T 2007 *Phys. Rev. A* **76** 023811
- [22] Yu P, Li J, Tang C, Cheng H, Liu Z, Li Z, Liu Z, Gu C, Li J, Chen S, Tian J 2016 *Light: Sci. Appl.* **5** e16096
- [23] Tang D, Wang C, Zhao Z, Wang Y, Pu M, Li X, Gao P, Luo X 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 713
- [24] Li X, Ma X, Luo X 2017 *Opto-Electron. Eng.* **44** 255 (in Chinese) [李雄, 马晓亮, 罗先刚 2017 *光电工程* **44** 255]
- [25] Li G, Sartorello G, Chen S, Nicholls L H, Li K F, Zentgraf T, Zhang S, Zayats A V 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1800034
- [26] Fan R, Xiong B, Peng R W, Wang M 2019 *Adv. Mater.* **32** 1904646
- [27] He Y, Wen Z, Chen L, Li Y, Ning Y, Chen G 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 1801
- [28] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Nature* **425** 944
- [29] Song B S, Noda S, Asano T, Akahane Y 2005 *Nat. Mater.* **4** 207
- [30] McNab S J, Moll N, Vlasov Y A 2003 *Opt. Express* **11** 2927
- [31] Faolain L O, Yuan X, McIntyre D, Thoms S, Chong H, Rue R M D L, Krauss T F 2006 *Electron. Lett.* **42** 1454
- [32] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [33] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096
- [34] Wonjoo S, Zheng W, Shanhui F 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1511
- [35] Imada M, Noda S, Chutinan A, Tokuda T, Murata M, Sasaki G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 316
- [36] Zheng W, Ren G, Xing M, Chen W, Liu A, Zhou W, Baba T, Nozaki K, Chen L 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 081109
- [37] Huang X, Lai Y, Hang Z H, Zheng H, Chan C T 2011 *Nat. Mater.* **10** 582
- [38] Yao Z, Luo J, Lai Y 2016 *Opt. Lett.* **41** 5106
- [39] Hea C, Sun X, Liu X, Lu M, Chen Y, Feng L, Chen Y 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **113** 4924
- [40] Feng L, Ayache M, Huang J, Xu Y L, Lu M H, Chen Y F, Fainman Y, Scherer A 2011 *Science* **333** 729
- [41] Wang Z, Chong Y, Joannopoulos J D, Soljacic M 2009 *Nature* **461** 772
- [42] Wang H, Zhang X 2011 *Phys. Rev. A* **83** 053820
- [43] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M 2014 *Nat. Photonics* **8** 821
- [44] Song D, Paltoglou V, Liu S, Zhu Y, Gallardo D, Tang L, Xu J, Ablovitz M, Efremidis N K, Chen Z 2015 *Nat. Commun.* **6** 6272
- [45] Deng H, Chen X, Panoiu N C, Ye F 2016 *Opt. Lett.* **41** 4281
- [46] Wu X, Meng Y, Tian J, Huang Y, Xiang H, Han D, Wen W 2017 *Nat. Commun.* **8** 1304
- [47] Chen X D, Zhao F L, Chen M, Dong J W 2017 *Phys. Rev. B* **96** 020202
- [48] Wu Y, Hu X, Gong Q 2018 *Phys. Rev. Mater.* **2** 122201
- [49] Peng L, Chen Y, Yang Y, Wang Z, Yu F, Wang G, Shen N H, Zhang B, Soukoulis C M, Chen H 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1800002
- [50] Yang Y, Xu Y F, Xu T, Wang H X, Jiang J H, Hu X, Hang Z H 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 217401
- [51] Hu C, Li Z, Tong R, Wu X, Xia Z, Wang L, Li S, Huang Y, Wang S, Hou B, Chan C T, Wen W 2018 *Phys. Rev. Lett.*

- 121 024301
- [52] Xie B, Su G, Wang H, Su H, Shen X, Zhan P, Lu M, Wang Z, Chen Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 233903
- [53] Song W, Sun W, Chen C, Song Q, Xiao S, Zhu S, Li T 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 165701
- [54] Wang Z, Chong Y D, Joannopoulos J D, Soljacic M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 013905
- [55] Yu Z, Veronis G, Wang Z, Fan S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 023902
- [56] Lu L, Gao H, Wang Z 2018 *Nat. Commun.* **9** 5384
- [57] Lu J, Qiu C, Ye L, Fan X, Ke M, Zhang F, Liu Z 2016 *Nat. Phys.* **13** 369
- [58] Hu X, Chan C T, Ho K, Zi J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 174501
- [59] Bi Y, Feng J, Li Y, Zhang X, Liu Y, Jin Y, Sun H 2013 *Adv. Mater.* **25** 6969
- [60] Wang Y, Liu H, Zhu J 2019 *APL Mater.* **7** 080906
- [61] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, Carson J J L 2011 *Opt. Express* **19** 26186
- [62] Shi L, Hakala T K, Rekola H T, Martikainen J P, Moerland R J, Torma P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 153002
- [63] Zhang Y W, Chen A, Liu W Z, Hsu C W, Wang B, Guan F, Liu X H, Shi L, Lu L, Zi J 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 186103
- [64] Yu X D, Shi L, Han D Z, Zi J, Braun P V 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 1910
- [65] Erementchouk M, Joy S R, Mazumder P 2016 *Proc. R. Soc. A* **472** 20160616
- [66] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [67] Wu F, Han D, Li X, Liu X, Zi J 2008 *Opt. Express* **16** 6619
- [68] Fung K H, Chan C T 2007 *Opt. Lett.* **32** 973
- [69] Lai Y, Han D Z, Fung K H, Zhang Z Q, Chan C T *Quadrupole Bands and Dirac-Point-like Dispersions in Metal Nanoparticle Chains* (Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology) Unpublished
- [70] Han D, Lai Y, Fung K, Zhang Z, Chan C T 2009 *Phys. Rev. B* **79** 195444
- [71] Liu J, Ding L, Zhao C, Liang C, Xiao Y, Zhang J, Xu W 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [72] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, Joannopoulos J D, Soljacic M 2016 *Nat. Rev. Phys.* **1** 16048
- [73] Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 183902
- [74] Hsu C W, Zhen B, Lee J, Chua S L, Johnson S G, Joannopoulos J D, Soljacic M 2013 *Nature* **499** 188
- [75] Yang Y, Peng C, Liang Y, Li Z, Noda S 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 037401
- [76] Dai S, Liu L, Han D, Zi J 2018 *Phys. Rev. B* **98** 081405(R)
- [77] Cumpsty N A, Whitehead D S 1971 *J. Sound Vib.* **18** 353
- [78] Xiao Y X, Ma G, Zhang Z Q, Chan C T 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 166803
- [79] Porter R, Evans D V 2005 *Wave Motion* **43** 29
- [80] Hirose K, Liang Y, Kurosaka Y, Watanabe A, Sugiyama T, Noda S 2014 *Nat. Photonics* **8** 406
- [81] Kodigala A, Lepetit T, Gu Q, Bahari B, Fainman Y, Kanté B 2017 *Nature* **541** 196
- [82] Yanik A A, Cetin A E, Huang M, Artar A, Mousavi S H, Khanikaev A, Connor J H, Shvets G, Altug H 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 11784
- [83] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M, Bogdanov A, Kivshar Y 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 193903
- [84] Liu Z, Xu Y, Lin Y, Xiang J, Feng T, Cao Q, Li J, Lan S, Liu J 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 253901
- [85] He Y, Guo G, Feng T, Xu Y, Miroshnichenko A E 2018 *Phys. Rev. B* **98** 161112
- [86] Friedrich H, Wintgen D 1985 *Phys. Rev. A* **32** 3231
- [87] Gao X, Hsu C W, Zhen B, Lin X, Joannopoulos J D, Soljacic M, Chen H 2016 *Sci. Rep.* **6** 31908
- [88] Bulgakov E N, Maksimov D N 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 267401
- [89] Zhen B, Hsu C W, Lu L, Stone A D, Soljacic M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 257401
- [90] Doleman H M, Monticone F, den Hollander W, Alu A, Koenderink A F 2018 *Nat. Photonics* **12** 397
- [91] Quinten M, Leitner A, Krenn J R, Aussenegg F R 1998 *Opt. Lett.* **23** 1331
- [92] Brongersma M L, Hartman J W, Atwater H A 2000 *Phys. Rev. B* **62** R16356
- [93] Maier S A, Kik P G, Atwater H A, Meltzer S, Harel E, Koel B E, Requicha A A 2003 *Nat. Mater.* **2** 229
- [94] Li K, Stockman M I, Bergman D J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 227402
- [95] Wu F, Han D, Hu X, Liu X, Zi J 2009 *Journal of Physics: Condensed Matter* **21** 185010
- [96] Burgos S P, de Waele R, Polman A, Atwater H A 2010 *Nat. Mater.* **9** 407
- [97] Han D, Lai Y, Zi J, Zhang Z Q, Chan C T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 123904
- [98] Weick G, Woollacott C, Barnes W L, Hess O, Mariani E 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 106801
- [99] Shen X P, Cui T J, Martin-Cano D, Garcia-Vidal F J 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110** 40
- [100] Xiang H, Meng Y, Zhang Q, Qin F F, Xiao J J, Han D, Wen W 2015 *Opt. Commun.* **356** 59
- [101] Liu L, Yang C, Yang J, Xiang H, Han D 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** 1130
- [102] Shen X, Cui T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 211909
- [103] Gao X, Zhou L, Yu X Y, Cao W P, Li H O, Ma H F, Cui T J 2015 *Opt. Express* **23** 23270
- [104] Bravo-Abad J, Degiron A, Przybilla F, Genet C, García-Vidal F J, Martín-Moreno L, Ebbesen T W 2006 *Nat. Phys.* **2** 120
- [105] Yi J M, Cucho A, Devaux E, Genet C, Ebbesen T W 2014 *ACS Photonics* **1** 365
- [106] Zhu X, Vannahme C, Højlund-Nielsen E, Mortensen N A, Kristensen A 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 325
- [107] Hao J, Wang J, Liu X, Padilla W J, Zhou L, Qiu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104
- [108] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342
- [109] Li G, Chen X, Li O, Shao C, Jiang Y, Huang L, Ni B, Hu W, Lu W 2012 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** 205102
- [110] Schokker A H, Koenderink A F 2014 *Phys. Rev. B* **90** 155452
- [111] Stehr J, Crewett J, Schindler F, Sperling R, von Plessen G, Lemmer U, Lupton J M, Klar T A, Feldmann J, Holleitner A W, Forster M, Scherf U 2003 *Adv. Mater.* **15** 1726
- [112] Nau D, Seidel A, Orzekowsky R B, Lee S H, Deb S, Giessen H 2010 *Opt. Lett.* **35** 3150
- [113] Shi L, Yuan X, Zhang Y, Hakala T, Yin S, Han D, Zhu X, Zhang B, Liu X, Torma P, Lu W, Zi J 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 717
- [114] Li J F, Huang Y F, Ding Y, Yang Z L, Li S B, Zhou X S, Fan F R, Zhang W, Zhou Z Y, Wu D Y, Ren B, Wang Z L, Tian Z Q 2010 *Nature* **464** 392
- [115] Luo X, Qiu T, Lu W, Ni Z 2013 *Mater. Sci. Eng., R* **74** 351
- [116] Liu G B, Xiao D, Yao Y, Xu X, Yao W 2015 *Chem. Soc.*

- Rev.* **44** 2643
- [117] Zheng D, Li Y, Chen W, Fu T, Sun J, Zhang S, Xu H 2019 *Sci Sin-Phys Mech Astron* **49** 124205 (in Chinese) [郑迪, 李杨, 陈文, 付统, 孙嘉伟, 张顺平, 徐红星 2019 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **49** 124205]
- [118] Chen W, Zhang S, Kang M, Liu W, Ou Z, Li Y, Zhang Y, Guan Z, Xu H 2018 *Light: Sci. Appl.* **7** 56
- [119] Butun S, Tongay S, Aydin K 2015 *Nano Lett.* **15** 2700
- [120] Lin J, Li H, Zhang H, Chen W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 203109
- [121] Fei R, Yang L 2014 *Nano Lett.* **14** 2884
- [122] Han X, Stewart H M, Shevlin S A, Catlow C R A, Guo Z X 2014 *Nano Lett.* **14** 4607
- [123] Kim J, Baik S S, Ryu S H, Sohn Y, Park S, Park B G, Denlinger J, Yi Y, Choi H J, Kim K S 2015 *Science* **349** 723
- [124] Liu Z, Aydin K 2016 *Nano Lett.* **16** 3457
- [125] Zhan T R, Zhao F Y, Hu X H, Liu X H, Zi J 2012 *Phys. Rev. B* **86** 165416
- [126] Chern R L, Han D 2014 *Opt. Express* **22** 4817
- [127] Chernozatonskii L A, Demin V A, Lambin P 2016 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18** 27432
- [128] Jin D F, Christensen T, Soljačić M, Fang N X, Lu L, Zhang X 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 245301
- [129] Nikitin A Y, Guinea F, García-Vidal F J, Martín-Moreno L 2011 *Phys. Rev. B* **84** 161407(R)
- [130] Silveiro I, Ortega J M P, Abajo F J G d 2015 *New J. Phys.* **17** 083013
- [131] Zhao B, Zhang Z M 2015 *ACS Photonics* **2** 1611
- [132] Jablan M, Soljagic M, Buljan H 2013 *Proc. IEEE* **101** 1689
- [133] Zhao T, Hu M, Zhong R, Gong S, Zhang C, Liu S 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110**
- [134] Thongrattanasiri S, Koppens F H, Garcia de Abajo F J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 047401
- [135] Fang Z, Wang Y, Schlather A E, Liu Z, Ajayan P M, García de Abajo F J, Nordlander P, Zhu X, Halas N J 2014 *Nano Lett.* **14** 299
- [136] Lu H, Zeng C, Zhang Q, Liu X, Hossain M M, Reineck P, Gu M 2015 *Sci. Rep.* **5** 8443
- [137] Wang B, Zhang X, Garcia-Vidal F J, Yuan X, Teng J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 073901
- [138] Butet J, Brevet P F, Martin O J F 2015 *ACS Nano* **9** 10545
- [139] Kauranen M, Zayats A V 2012 *Nat. Photonics* **6** 737
- [140] Robert W B 2003 *Nonlinear Optics* (2nd Ed.) (New York: Elsevier) pp94–99
- [141] Ren M, Xu J 2013 *Laser Optoelectron. Prog.* **50** 080002 (in Chinese) [任梦昕, 许京军 2013 *激光与光电子学进展* **50** 080002]
- [142] Törmä P, Barnes W L 2014 *Rep. Prog. Phys.* **78** 013901
- [143] Kravets V G, Kabashin A V, Barnes W L, Grigorenko A N 2018 *Chem. Rev.* **118** 5912
- [144] Kamat P V, Hartland G V 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 1467
- [145] Boriskina S V, Ghasemi H, Chen G 2013 *Mater. Today* **16** 375
- [146] Baranov D G, Wersäll M, Cuadra J, Antosiewicz T J, Shegai T 2018 *ACS Photonics* **5** 24

SPECIAL TOPIC—Optical metamaterials

Plasmonic band structures and its applications*

Liu Liang¹⁾ Han De-Zhuan^{2)†} Shi Lei^{3)‡}

1) (*College of Math and Physics, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China*)

2) (*College of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331, China*)

3) (*Key Laboratory of Micro & Nano Photonic Structures (MOE), Key Laboratory of Surface Physics, Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

(Received 8 February 2020; revised manuscript received 22 March 2020)

Abstract

Due to its special optical properties the surface plasmon polariton (SPP) has been applied to many fields such as chemistry, biology, communication, nano energy. The more in-depth researches on plasmonic band structures can conduce to understanding more the properties of plasmonic micro- and nano-structures. In this review, we first introduce some metal structures which have plasmonic band structures. Then, we review some unique properties of plasmonic band structures including bound state in the continuum, waveguide, complete band gap, topology, etc. Based on the above properties, the plasmonic applications are introduced. Finally, we briefly introduce the band structures of graphene-based plasmonics and its applications.

Keywords: surface plasmon, band structure, photonic crystal, graphene

PACS: 73.20.Mf, 73.20.At, 42.70.Qs, 78.67.Wj

DOI: 10.7498/aps.69.20200193

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774063, 11727811, 91750102), the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2016YFA0301100, 2016YFA0302000, 2018YFA0306201), the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant Nos. 17ZR1442300, 17142200100), and the Special Funds of President Foundation of Chongqing University (Grant No. 2019CDXZWL002).

† Corresponding author. E-mail: dzhan@cqu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lshi@fudan.edu.cn