

电磁超表面*

孙树林¹ 何琼² 周磊^{2,†}

(1 复旦大学光科学与工程系 上海超精密光学制造工程技术研究中心 上海 200433)

(2 复旦大学物理系 表面物理国家重点实验室 上海 200433)

2014-07-22收到

† email: phzhou@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20150603

Electromagnetic metasurfaces

SUN Shu-Lin¹ HE Qiong² ZHOU Lei^{2,†}

(1 Department of Optical Science and Engineering and Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Optical Manufacturing, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2 Physics Department and State Key Laboratory of Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

摘要 光学是认识光和控制光的科学,其中光相位的调控扮演着重要角色。最近人们提出了电磁超表面的概念,通过设计非均匀人工微结构来实现亚波长尺度下的任意电磁相位分布,根据惠更斯原理进而实现任意波前调控。

关键词 超表面, 特异介质, 惠更斯原理, 相位, 波前调控

Abstract Optics is the science of understanding and controlling light, in which phase manipulation plays an important role. Recently, electromagnetic metasurfaces consisting of carefully designed inhomogeneous microstructures have been developed, in which any phase distribution can be realized and controlled on a subwavelength scale. By this means we may achieve arbitrary wavefront manipulation based on the Huygens principle.

Keywords metasurface, metamaterial, Huygens principle, phase, wavefront manipulation

1 引言

光学是一门古老的学科,战国时期思想家墨子总结出著名的光学八条,例如“二临鉴而立,景到,多而若少,说在寡区”,意思是“二人临镜而站,影子相反,若大若小,原因在于镜面的弯曲”,这说明人们很早就发明了镜子并开始研究物像间的关系;另外,考古发掘证明,早在

约3000年前,古亚述人就会用水晶制作凸透镜,虽然其用途不得而知,但这些发明都孕育了早期光学的萌芽。公元16世纪末,李普西和詹森分别独立发明了显微镜,后来虎克利用显微镜首次发现了细菌,人们开始利用其研究微观世界;公元17世纪初,李普西等人发明了望远镜,人们突破肉眼视野有限的限制,开始探索宏观宇宙的奥秘。17世纪上半叶,斯涅耳和笛卡尔研究了光的反射和折射现象,提出了光所满足的反射定律和折射定律。1655年,牛顿进行了著名的太阳光谱实验,利用三角棱镜将太阳光谱分离到不同折射角度上,并且根据光的直线传

* 国家自然科学基金(批准号: 11174055, 11204040, 11474057, 11404063)、上海市浦江人才基金(批准号: 14PJ1401200)资助项目;上海市优秀学术带头人项目(批准号: 12XD1400700);中国博士后科学基金(批准号: 2012M520039, 2013T60412)资助项目

播特性，提出光是一种微粒流；而惠更斯是光微粒说的反对者，并和菲涅耳提出了著名的惠更斯—菲涅耳定律：光像声一样，以球形波面传播，波阵面上的每一点作为次波源，将以一定强度和相位的球面波形式继续传播，次波的相干叠加形成新的波阵面(见图1)，之后人们还认识到了光的偏振特性，这些都为波动光学奠定了重要基础。1860年前后，麦克斯韦揭示了电场和磁场可以相互转化形成电磁波并以一定速度传播，而光也是一种电磁波。当然，光具有波粒二相性，本文关注的重点是宏观世界，即满足波动光学，在光调控的历史发展中，根据惠更斯原理通过调控光相位来重构波相面占了主要部分，图2所示的光学器件就是鲜活的例子。

在光学漫长历史中，近来兴起的电磁特异介质领域显得格外亮眼，人们对经典光学的认知被极大拓展。所谓电磁特异介质，是指由人工亚波长结构(“人工原子”)按照一定宏观序排列而成的复合材料，电磁波波长远大于“人工原子”的单元尺度从而很难分辨其微观结构，因此特异介质可近似等效为均匀媒质^[1, 2]。借助电磁共振机理，特异介质原则上可实现任意大小的等效介电常数和磁导率，这远远突破了自然材料所能覆盖的光学参数范围，因此“人工原子”对电磁波的调控能力远强于“自然原子”。早期特异介质的设计通常采用简单周期序，这类似于大多数自然材料的排列方式，后来人们开始利用宏观序这一重要自由度，设计光学参数具有缓变序的梯度特异介质，陆续实现了光学隐身^[3, 4]、光学幻像^[5, 6]等概念。最近，人们进一步提出具有复杂宏观序的电磁特异介质表面(简称超表面)，在设计梯度超表面时，充分利用了“人工原子”和“宏观序”两个重要自由度，在外界光照射下，人工原子作为次波源

上可实现任意的电磁辐射强度和相位分布，依据惠更斯原理可实现任意的电磁波波前调控(见图1)，梯度电磁超表面具有广泛的研究及应用前景。

本文第二节介绍早期具有简单周期序的均匀型电磁超表面，第三节重点介绍具有复杂突变序梯度型电磁超表面的机理和效应，最后将作出总结和展望。

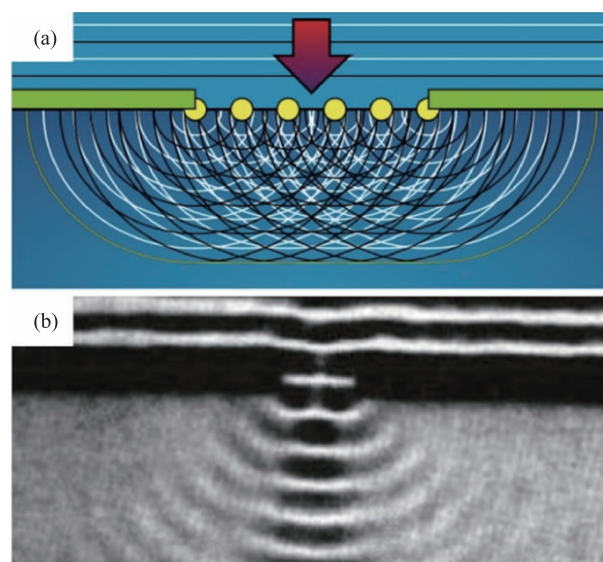


图1 惠更斯原理

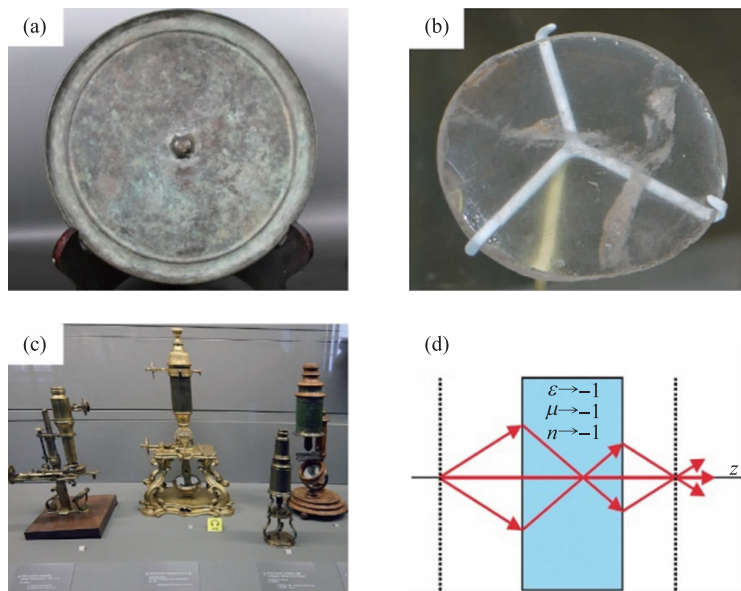


图2 光学器件的历史发展 (a)铜镜；(b)亚述棱镜；(c)显微镜；(d)超透镜^[1]

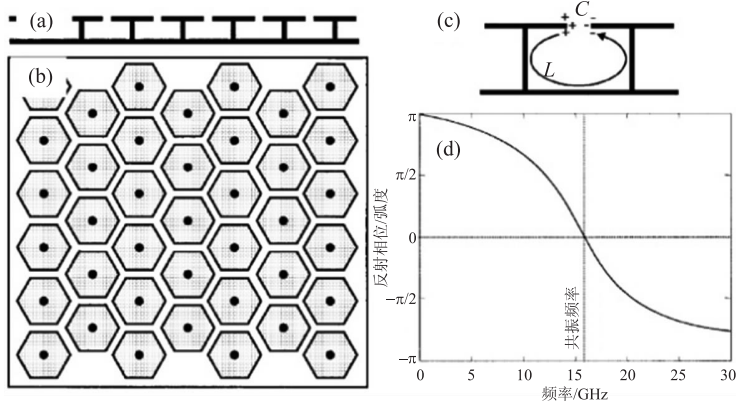


图3 高阻抗表面的结构、原理及反射相位^[7]

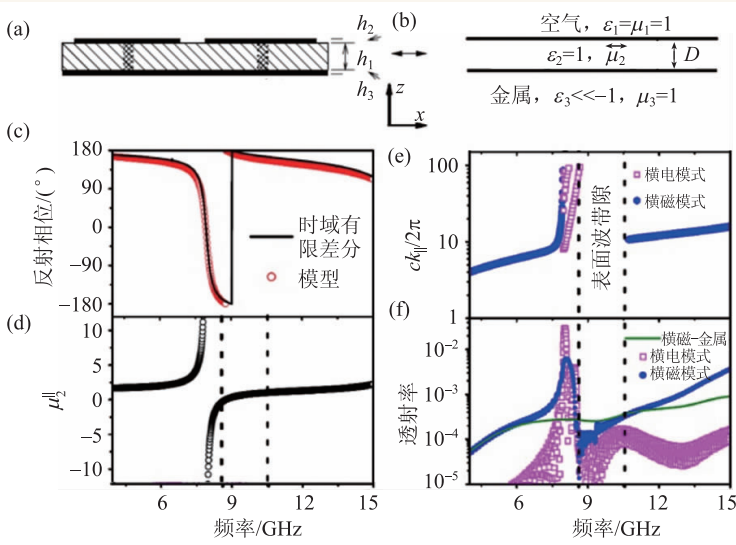


图4 高阻抗表面等效媒质模型及表面波能带分析^[8]

消抑制其辐射，为了避免这一问题，天线与金属反射镜的距离需要保持在1/4波长左右，我们能否打破这一限制？20世纪90年代末，人们提出了高阻抗表面结构^[7](见图3)，它是由亚波长金属结构/介质层/金属底板组成的三明治结构，顾名思义，高阻抗表面对电磁波的阻抗非常高，因此会将电磁波完全反射。高阻抗表面的结构单元远小于其工作波长，根据等效电路模型理论，高阻抗表面具有等效电感 L 和电容 C ，因此系统具有特定的共振频率(即 $\sqrt{1/LC}$)，在共振频率附近高阻抗表面的等效阻抗极高，这意味着其表面的横向磁场极弱而横向电场极强，其行为非常像“磁导体”；而当电磁波频率远离高阻抗表面的共振频率时，系统的电磁响应回归“电导体”，这些特性使得高阻抗表面在不同频率下具有迥异的反射相位(见图3(d))，在系统的共振频率时，其反射相位为 0° ，这意味着当天线即使无限靠近高阻抗表面也可以保持同相位干涉相长，天线具有极高的辐射效率，这就克服了传统天线基板的1/4波长间距限制，从而满足天线系统小型化的要求。我们将这类对

电磁波具有特殊调控特性的超薄人工微结构统称为电磁超表面，高阻抗表面是其中的重要一类。

2 均匀型电磁超表面

2.1 高阻抗表面

反射镜是生活中应用最普遍的光学元件之一，公元前2000年左右中国古人就制造出铜镜以正衣冠，现在的镜子通常是附有金属薄膜的玻璃，可见金属在反射镜中扮演的重要角色，追根溯源是由于金属具有极大的光学介电常数因而会几乎完全反射光。在通信领域，为了实现天线的定向辐射也需要为其加装一面“金属反射镜”，但是天线不能无限靠近反射镜，否则天线辐射的电磁波被金属反射后由于半波损失会造成干涉相

2.2 高阻抗表面的等效媒质模型

高阻抗表面在提出后，立刻吸引众人的广泛关注，各式各样的设计也应运而生，但其结构万变不离其宗，所改变的只是上层亚波长金属结构的形状，要了解高阻抗表面的电磁响应主要是借助数值模拟或实验测量，这种做法不仅耗时而且很难理解背后的物理。能否用简单物理模型来描述并解释高阻抗表面？为此人们曾提出过 LC 电路模型^[7]，但这只适用于结构简单的高阻抗表面

系统，并且难以理解高阻抗表面所支持的表面波模式。2007年，周磊课题组提出如图4所示的等效媒质模型^[8]，在外界电磁波的照射下，上下层金属结构之间相互耦合，从而激发反向的诱导电流，这使得高阻抗表面结构可提供沿 y 方向的磁响应，无论人们设计的高阻抗表面上层人工亚波长金属结构形状如何，都可以用一层等效磁导率 μ 的等效媒质代替(见图4(b))，并且在高阻抗表面的共振频率处，系统等效磁导率 μ 发散，因而等效于“磁导体”，电磁波的反射相位为 0° 。利用这个等效媒质模型，我们不仅可以描述高阻抗表面对电磁波相位的响应特性，还可以计算高阻抗表面的表面波能带结构(见图4(e))，其中的关键因素是系统等效磁导率 μ 的色散特性。

2.3 偏振调控超表面

偏振特性是光的重要物理信息，人们观看三维电影所佩戴的立体眼镜镜片其实是两个相互垂直的偏振片，借此两眼分别看到不同摄像机从不同角度所拍摄到的影像，从而感受到立体效果，蜜蜂的复眼可以感知太阳光的偏振，并借此确定太阳方位并用来定位，LED显示也利用了光的偏振特性，在天文学上人们通过研究宇宙微波背景的偏振特性来探索早期宇宙的物理性质。鉴于光偏振的众多应用，实现对光偏振的调控至关重要，传统手段包括光栅、偏振片、双折射晶体、布鲁斯特效应等，它们的缺点是要牺牲入射光的部分能量，如何实现高效率的偏振调控？2007年，周磊课题组提出利用各向异性超表面实现电磁波偏振完美转换，该过程完全没有能量损失，从而实现100%的转化效率，超表面是由“工”字型金属/介质材料/金属平板组成的三明治结构(见图5)，其等效媒质模型是由空气层(ϵ_1, μ_1 , 上)、各向异性介质层(ϵ_2, μ_2 , 中)、金属层(ϵ_3, μ_3 , 下)所组成^[9]。实验测量和数值模拟证明，当垂直入射电磁波的电场偏振方向与 x 轴夹角为 45° 时，在系

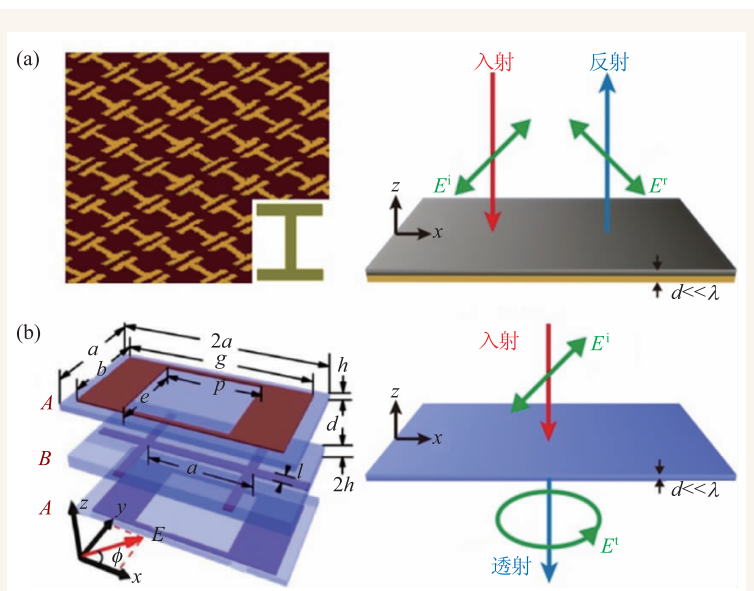


图5 反射式^[9]和透射式^[11]偏振调控超表面的结构及调控效果

统共振频率附近，入射电磁波被反射后，偏振被调控到垂直方向上，效率为100%(见图5(a))，其实这里偏振转换的物理机理非常简单。该各向异性超表面在 x 和 y 方向具有不同的共振频率，当处在 x 方向的共振频率时，系统的 $\mu_{xx} \rightarrow \infty$ ，而 μ_{yy} 为有限值，这意味着对于 x 偏振电磁波，超表面响应为“磁导体”，反射率为1而反射相位为 0° ，而对于 y 偏振电磁波，系统响应是“电导体”，其反射率为1而反射相位为 180° 。这意味着入射电磁波被超表面反射后，电场 x 分量保持不变而 y 分量反向，因此反射波的偏振会被完全调控至垂直方向，从而实现了高效偏振转化。换个角度来说，该超表面等效于一个超薄的人工双折射材料，因此可以实现偏振调控作用。与传统偏振调控方法相比，超表面具有效率高、厚度薄等优势。之后我们还实现了光频段高效偏振转化^[10]，并制作了完美透射的 $1/4$ 波片，可实现线偏、椭圆偏(见图5(b))的完美偏振调控^[11]，偏振调控超表面引发了国内外同行的广泛关注^[12-14]。

3 梯度型电磁超表面

3.1 广义斯涅耳定律

当光入射到两种媒质交界面处时会产生反射

和折射，其方向满足经典斯涅耳定律，如图 6(a) 所示，由物点 O 发出的光经折射后会聚于像点 O' ，根据费马原理两点间不同光路光程相等且最短，可得 $n_i \cdot A'B' = n_t \cdot AB$ ，由此推出经典斯涅耳折射定律。假设在两种媒质界面处有一层超薄的超表面，它会给入射光提供线性梯度的相位突变，如图 6(a) 所示，在 A 和 B' 两点的相位突变分别为 Φ 和 $\Phi + d\Phi$ ，此时光路方程需要改写为 $n_i \cdot A'B' + (\Phi + d\Phi) = n_t \cdot AB + \Phi$ ，同样反射光的光路方程也需要做类似的改写，此时反射光和透射光满足下面的方程：

$$\sin \theta_r n_i - \sin \theta_t n_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}$$

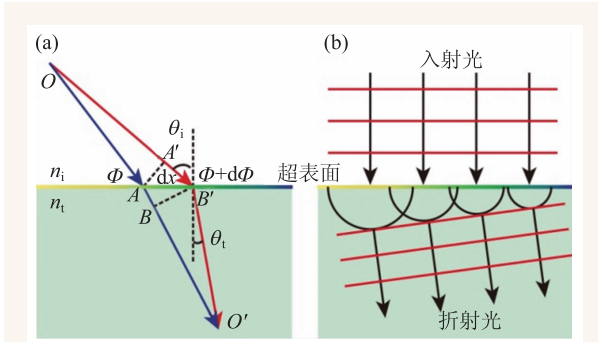


图 6 满足广义斯涅耳定律的奇异折射现象

$$\sin \theta_r - \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx} \quad (1)$$

式中的 $d\Phi/dx$ 代表突变相位梯度，这就是广义斯涅耳定律。这意味着即使入射光垂直入射，折射角也不会为零，这种奇异透射可以用惠更斯原理解释。如图 6(b) 所示，当光垂直照射超表面时，超表面上每点作为次波源的辐射相位各不相同，因此激发出不同半径的球面波，它们的共相面为斜方向的平面，因此产生奇异折射光。

2011 年，Capasso 课题组首先提出超表面来拓展斯涅耳定律，并设计结构渐变的 V 型天线阵列的超表面结构提供梯度的相位突变^[15] (见图 7 (a), (b))。超表面每个子结构的尺寸都是亚波长量级，在入射光的照射下，作为次波源辐射相位各不相同并呈线性分布，Capasso 课题组在红外波段实验验证了超表面的反射和折射满足广义斯涅耳定律。需要指出的是，由于 V 型超表面的结构特殊性，当入射光照射超表面时，不仅会产生奇异反射/折射(满足广义斯涅耳定律)，还会产生正常反射/折射(满足经典斯涅耳定律，图 7(b) 所示)，因此奇异反射/折射模式转化效率较低，并且

奇异反射/折射的偏振还和入射光垂直。随后 Shalaev 课题组将这种 V 形超表面推广至近红外波段，并证明该系统具有宽频特性^[16]。

3.2 梯度超表面实现高效表面波耦合

根据惠更斯原理，特定的电磁波波前可以通过设计相应的梯度超表面来实现，高阻抗超表面可以完全反射电磁波并且实现 360° 范围的反射相位调控，因此在电磁波波前调控方面具有天然优势。电磁波照射到金属导体上会发生镜面反射，如果在金属表面加入一层厚度远小于波长的梯度特异介质，它在 x 处的相对介电常数和磁导率用 $\epsilon_M(x)$, $\mu_M(x)$ 表示。分析发现，如果满足 $\epsilon_M(x) = \mu_M(x) = 1 + \zeta x / (2k_0 d)$ ，系统的

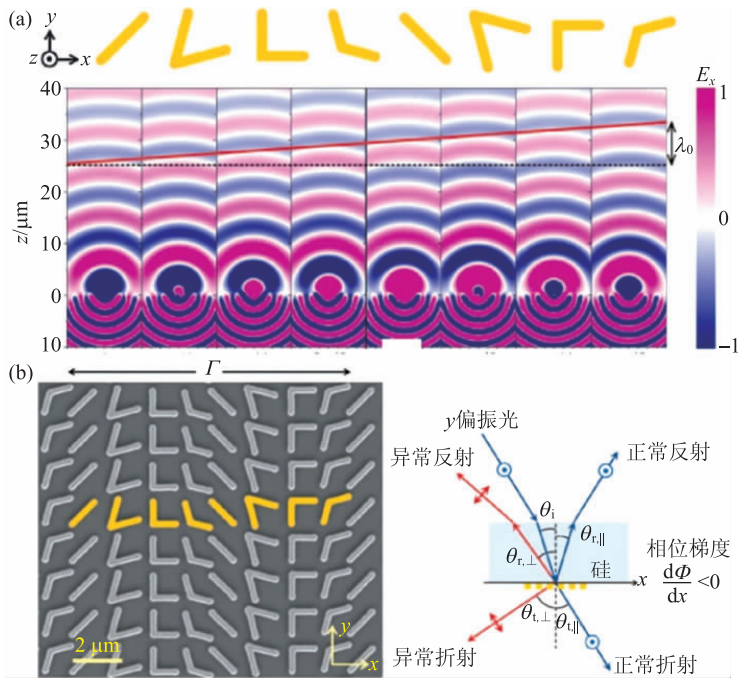


图 7 (a) 梯度超表面子结构辐射场分布；(b) 样品照片和实验示意图^[15]

反射相位满足线性分布，反射相位沿 x 方向的梯度为 $\zeta = d\Phi/dx$ ，这里 k_0 是真空中波矢， d 是特异介质的厚度。模展开理论计算^[17, 18]及数值模拟证明，当 $\zeta < k_0$ 时，垂直入射的电磁波会被超表面斜反射，而当 ζ 增大时，电磁波的反射角度也跟着增大，这就是梯度超表面实现的奇异反射现象(见图 8(a), (b))。更有趣的是，当反射相位梯度 $\zeta > k_0$ 时，入射的传播波被完美地转化为表面波(见图 8(c))，这是人们首次提出利用梯度超表面实现高效表面波耦合的全新概念^[17]。

要实现 $\varepsilon_M(x) = \mu_M(x)$ 的梯度超表面异常困难。若要实现线性反射相位分布，可以选择 $[\varepsilon_M(x) = \text{const.}, \mu_M(x)]$ 或 $[\varepsilon_M(x), \mu_M(x) = \text{const.}]$ 的梯度超表面，这三种模型其本质都是为了实现梯度折射率分布，从而达到线性反射相位分布。我们基于 $[\varepsilon_M(x) = \text{const.}, \mu_M(x)]$ 的模型系统，在微波段设计并制备了三块梯度超表面，它们具有不同的相位梯度 ζ ($= 0.4k_0, 0.8k_0, 1.14k_0$)， $\zeta = 1.14k_0$ 的实验样品结构如图 9 所示，它是一种结构渐变的高阻抗表面，结构单元由“H”型金属/介质层/金属平板组成，我们通过改变“H”型金属的臂长来控制超表面局域位置对电磁波的反射相位响应。样品的工作频率为 15 GHz，入射电磁波电场沿 x 方向。为了简化设计，我们采用了超周期结构。借助数值模拟，三块样品在不同 x 位置的反射相位分布 $\Phi(x)$ 如图 9(c), (e), (g) 所示，三块样品反射相位符合预期设计，呈线性分布且满足不同梯度 ζ 。数值模拟和远场实验证明， $\zeta = 0.4k_0$ 和 $\zeta = 0.8k_0$ 的梯度超表面会将正入射电磁波完全反射至 23° 和 53° 的方向上，最为有

趣的是， $\zeta = 1.14k_0$ 的样品辐射场几乎完全消失，根据理论设计，超表面将入射波完美地转化为表面波束缚在超表面上。为了验证预言，我们又采用近场测量技术^[19]做进一步测量，图 10 显示了梯度超表面附近的 E_z 电场，它暗含了反射波波矢信息，通过测量两个 E_z 场波峰间的距离就可得到反射波的水平波长 λ_x ，由此进一步得到反射波水平波矢 $k_x = 2\pi/\lambda_x \approx 1.14k_0$ ，由 $k_x > k_0$ 可

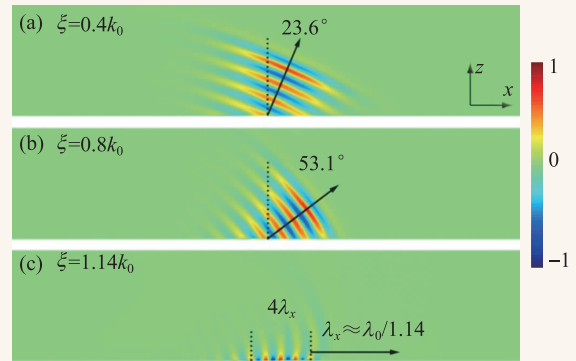


图 8 梯度超表面实现高效奇异反射((a), (b))和表面波耦合(c)^[17]

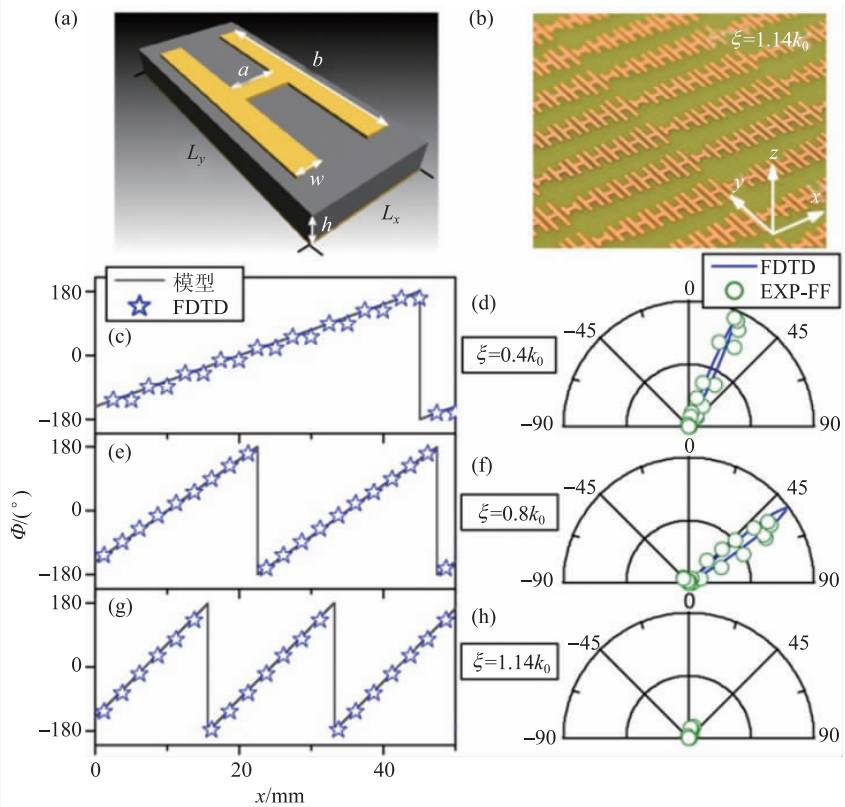


图 9 梯度超表面样品照片、反射相位分布及散射场分布^[17]

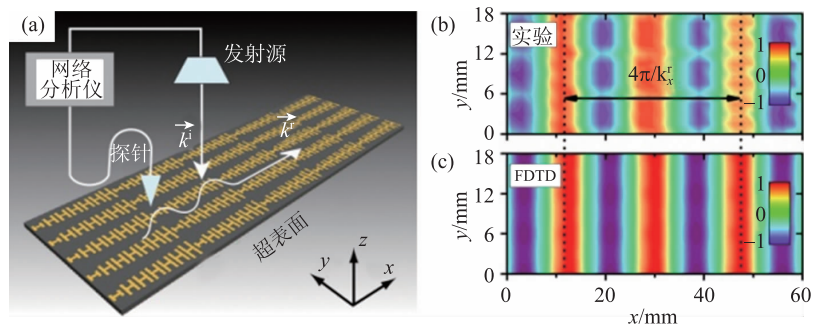


图10 梯度超表面近场测量^[17]

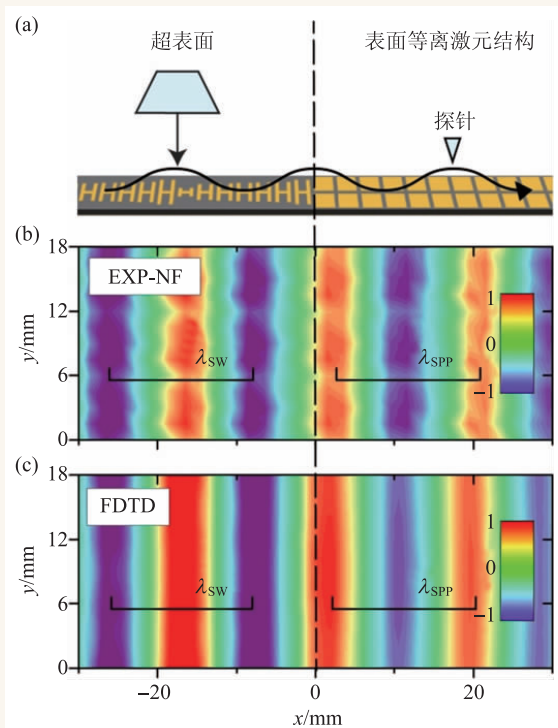


图11 梯度超表面等离激元耦合器 (a)实验架构; (b)近场实验(EXP-NF), 其中 λ_{sw} 为表面波波长, λ_{spp} 为表面等离激元波长; (c)数值模拟的表面 E_z 场分布^[17](FDTD为时域有限差分)

知, 反射波的 k_x 是纯虚数, 这直接证明了反射波为束缚在超表面上的表面波。

反射式梯度超表面的工作原理可用下面的方程描述:

$$k_x^r = k_0 \sin \theta_r = \zeta + k_0 \sin \theta_i, \quad (2)$$

可以看出, 反射波的水平波矢 k_x^r 来源于两部分, 其中 ζ 是超表面的反射相位梯度, 它等效于反射波提供的部分水平波矢, 而 $k_0 \sin \theta_i$ 是入射波原本携带的水平波矢, 该方程等效于广义斯涅耳定律。根

据(2)式, 我们若要实现表面波耦合, 可以设计 $\zeta > k_0$ 的梯度超表面, 并利用正入射电磁波激发表面波, 也可以设计 $\zeta < k_0$ 的梯度超表面, 利用斜入射电磁波实现表面波耦合, 临界入射角为 $\theta_{ic} = \sin^{-1}(\sin 90^\circ - \zeta/k_0)$ 。

需要强调的是, 梯度超表面所耦合的表面波并非本征态, 它是在入射电磁波驱动下的受激态, 在纳米光学领域, 人们非常关心如何高效地耦合本征的表面等离激元, 那么梯度超表面能否用来设计本征的表面等离激元耦合器? 由于在微波段金属是完美电导体, 表面等离激元处于非常弱局域的状态, 因此人们通常用表面电流来描述表面等离激元。幸运的是, 前面介绍的高阻抗表面支持微波段“本征表面等离激元”, 其色散关系可由高阻抗表面的结构参数来控制, 其行为非常类似于光频段表面等离激元^[20, 21]。借助高阻抗表面, 我们设计制备了超表面等离激元耦合器(见图11), 入射电磁波垂直照射系统左侧的梯度超表面首先被转变成受激表面波, 该受激表面波会耦合系统右侧的高阻抗表面上的本征表面等离激元, 从而将能量导引出去, 近场实验和数值模拟完美地验证了表面等离激元耦合器的成功运转。这里入射电磁波只照射左侧梯度超表面区域, 系统右侧高阻抗表面上的表面等离激元模式是左侧超表面上的表面波耦合传递而来的, 若电磁波只照射右侧类蘑菇高阻抗表面结构, 由于波矢不匹配, 入射波无法激发起表面等离激元, 这是第一次理论提出并实验验证梯度超表面高效耦合表面等离激元, 它突破了光栅法、全反射法等传统表面等离激元耦合法中效率低或多模式等问题, 该新概念对近场光学来说具有重要意义。

我们从新的角度再来理解下梯度超表面的光学响应, 超表面每个子单元在入射波照射下对电磁波的响应不同, 反射相位满足线性分布, 当反射相位梯度 $\zeta < k_0$ 时, 不同子单元的辐射场相互

干涉形成一个斜向的波阵面(见图 12(a)), 出射角度为 $\theta_r = \sin^{-1}(\xi/k_0)$; 当 $\xi > k_0$ 时, 不同子单元的辐射相位相差如此之大, 以致于不同子结构辐射波无法形成共相面, 因此系统的辐射波是局域在超表面附近的表面波(见图 12(b)). 另外, 在外界电磁波照射下, 超表面系统内会产生诱导电流, 可将其均匀化为等效面电流分布: $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = J_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} e^{-i\omega t} \delta(z) \hat{x}$, 由该面电流分布可换算得到系统等效电荷密度分布 $\rho(x, t) = (\xi J_0 / \omega) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} e^{-i\omega t} \delta(z)$, 它描述了电荷密度波以速度 $v_c = \omega / \xi$ 传输。当 $\xi < k_0$ 时, 电荷密度波的速度大于光速, 因此有电子的切伦科夫辐射(见图 12(c)), 而当 $\xi > k_0$ 时, 电荷密度波的速度小于光速, 因此没有电子的切伦科夫辐射^[22](见图 12(d)).

最近我们又把反射式梯度超表面推广至光波段, 图 13 显示超表面结构单元是由纳米金棒/介质层/金反射层组成, 当光照射到超表面时, 不同子结构作为次波源的辐射场相位各不相同并呈线性分布, 从而形成斜方向的辐射波前, 入射光被梯度超表面异常反射, 满足广义斯涅耳定律。在不同的入射角度下, 梯度超表面具有奇异的光调控效果, 反射角度满足(2)式, 即广义斯涅耳反射定律^[15-17]。图 14 展示了 3 个不同入射角度下所分别实现的负反射、正反射及表面波耦合。

图 14(a) 的灰色区域就是超表面的负反射区域, 入射角 θ_i 的范围是 $-\xi < k_0 \sin \theta_i < 0$, 此时, 入射光携带的水平波矢 $k_0 \sin \theta_i$ 小于梯度板所提供的水平波矢 ξ , 且两者反向, 因此入射光和反射光处在法线同侧, θ_i 和 θ_r 异号(见图 14(b))。当 θ_i 超过临界入射角 $\theta_{ic} = \sin^{-1}(\sin 90^\circ - \xi/k_0)$

时, 反射波的水平波矢大于 k_0 , 因此在超表面上激发起表面波(见图 14(d))。

3.3 超表面棱镜

棱镜是重要的传统光学器件, 其渐变厚度或特殊曲率使得入射波前被重新建构, 从而实现光会聚、光发散等调控效果, 传统棱镜在制作过程中需要精密的曲面打磨、相差矫正等复杂工艺, 其材料选择也非常有限, 例如具有均匀光学特性的玻璃、石英等。人工电磁特异介质的出现在光调控方面引发一系列革命性进展, 基于梯度式特异介质系统, 人们设计出工作在微波^[24]、太赫兹^[25, 26]以及光波段^[27-30]的各种平板式特异棱镜, 特异棱镜光学参数的梯度性取代了传统光学器件几何结构的梯度性, 而所有这些光学调控都还处于体调控范畴。最近梯度超表面引发了特异介质领域的巨

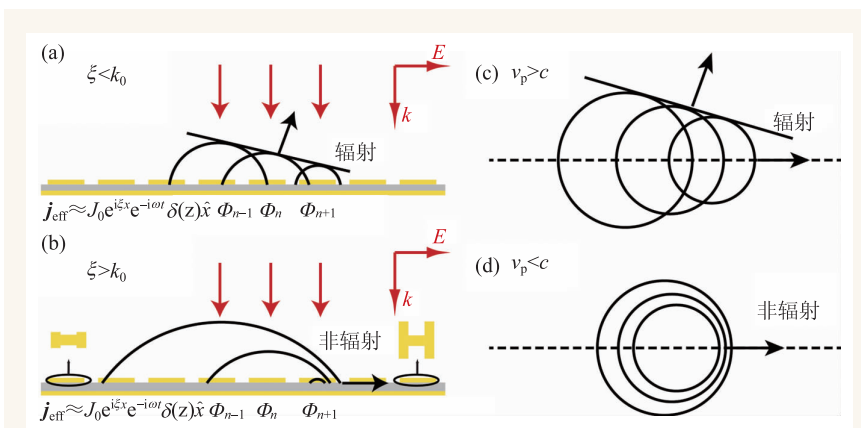


图 12 从惠更斯原理(a), (b)和切伦科夫辐射(c), (d)来理解梯度超表面的工作机理^[17]

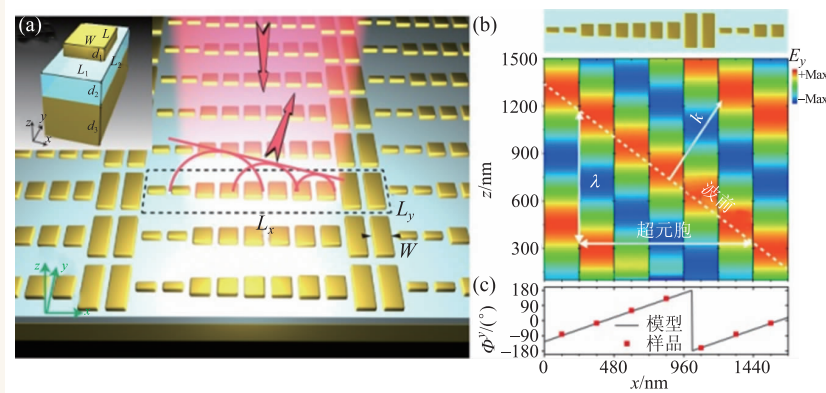


图 13 光波段梯度超表面的结构、原理及反射相位分布^[23]

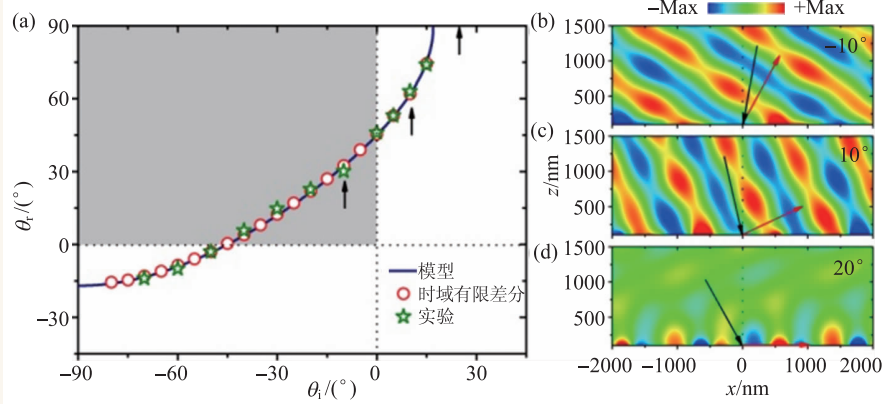


图14 广义斯涅耳定律的验证及不同电磁波调控效果^[23]

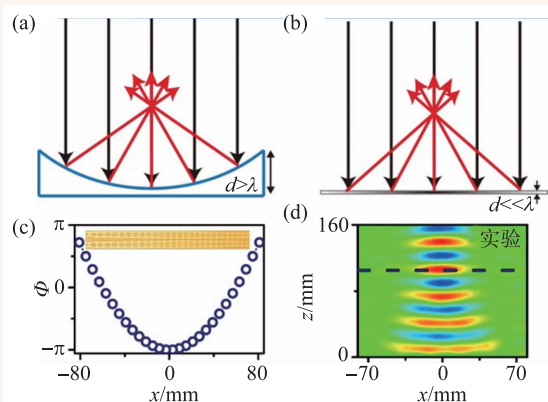


图15 超表面棱镜的原理、反射相位分布及会聚效果^[23]

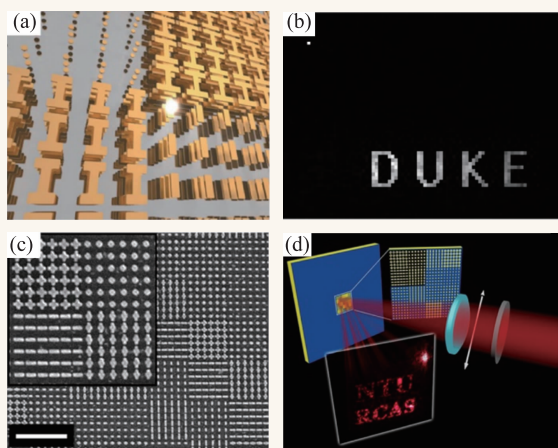


图16 梯度超表面全息成像^[33, 34]

变，超常光调控由体调控走向面调控，利用V字形天线阵列，人们设计了工作在通信波段的单色无相差超薄平板透镜和轴棱镜^[31]，为设计高数值孔径、超解析平板棱镜开辟了新方向。最近，我们设计制备了一块反射式梯度超表面棱

镜^[32]，它对入射平面波的反射相位分布呈双曲线形式，实验证明该棱镜可将入射光会聚(见图15)。相较传统体材料棱镜，梯度超表面棱镜厚度远小于波长(约为 $\lambda/20$)，可将所有电磁波反射并会聚于焦点，因此具有几乎100%工作效率，它在平板天线等方面具有重要应用价值。

3.4 超表面全息成像

特异超表面原则上可以实现任意的光波前调控，我们根据需要来设计超表面的透射/反射相位分布即可。超表面的设计利用了“人工原子”和“宏观序”两个自由度，因此电磁波调控的潜力巨大，目前已激发起众多新物理和新应用，诸如全息成像等成熟技术也借助梯度超表面重开枝芽。2012年，Smith课题组利用梯度特异介质实现了红外波段的全息成像(见图16(a), (b))^[33]。梯度结构不同区域具有各不相同的等效折射率，因此平面光从梯度系统射出后会积累各不相同的透射相位，从而构建新的光波波前，经过特殊设计实现了特定的成像效果。但该系统仍属于体材料，因而具有较强的反射以及损耗，入射光中真正转化为衍射影像的能量比率非常低，工作效率小于1%。最近，我们和蔡定平课题组合作，利用反射式梯度超表面实现了可见光波段的高效全息成像^[34]，利用系统的各向异性，可实现偏振控制的双像呈现。实验测量证明，超表面工作效率最高可达18%，工作波长覆盖了从可见光到近红外的宽广范围(见图16(c), (d))。

4 结束语

电磁超表面经历了由均匀型到梯度型的转变，对电磁波的调控能力逐步增强。最近出现的

梯度电磁超表面是由渐变的亚波长微结构按照特定宏观序排列而成的超薄特异介质,每个亚波长区域的微结构都经过精心设计,满足特定的透射/反射相位分布。根据惠更斯原理,在外界光照射下,梯度电磁超表面原则上可实现任意光波波前调控,诸如广义斯涅耳定律^[15-17, 35-42]、高效表面波耦合^[17, 36]、平板式棱镜^[32, 43-45]、新型全息成像^[33, 34, 45-47]、偏振依赖的奇异散射^[48, 49]、增强光自旋霍尔效应^[50]、新型电磁隐身^[51]等新概念及新应用被陆续提出,梯度超表面目前已成为特异介质领域的研究热点^[52-55],并具有损耗小、频带

宽、尺寸小等优点,这极大克服了传统特异体材料存在的损耗高、频带窄等巨大瓶颈,超表面的制备加工难度也远小于传统特异介质体材料,梯度超表面充分利用了宏观序这一自由度,极大拓展了人们调控电磁波的空间。电磁超表面具有深远的研究及应用潜力,接下来将朝着高频段、多维度、超宽带、高效率等指标,向新物理、新器件、新应用的方向迈进,如何实现动态可调的超表面^[56-58]也将是重要的挑战与机遇,电磁超表面的概念也被拓展到其他波领域^[59, 60]以激发更广泛的应用。

参考文献

- [1] Pendry J B. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(18):3966
- [2] Pendry J B. *Contemp. Phys.*, 2004, 45(3): 191
- [3] Leonhardt U. *Science*, 2006, 312(5781): 1777
- [4] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. *Science*, 2006, 312(5781): 1780
- [5] Lai Y, Ng J, Chen H Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102 (25): 253902
- [6] Chen H Y, Chan C T, Sheng P. *Nat. Mater.*, 2010, 9(5):387
- [7] Sievenpiper D, Zhang L, Broas R F J *et al.* *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, 1999, 47(11):2059
- [8] Hao J, Zhou L, Chan C T. *Appl. Phys. A*, 2007, 87(2):281
- [9] Hao J, Yuan Y, Ran L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99(6):063908
- [10] Hao J, Ren Q, An Z *et al.* *Phys. Rev. A*, 2009, 80(2):023807
- [11] Sun W, He Q, Hao J *et al.* *Opt. Lett.*, 2011, 36(6):927
- [12] Hao J, Qiu M, Zhou L *et al.* *Front. Phys. China*, 2010, 5(3):291
- [13] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R *et al.* *Science*, 2013, 340(6138):1304
- [14] Kang M, Chen J, Wang X L *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, 29 (4):572
- [15] Yu N, Genevet P, Kats M A *et al.* *Science*, 2011, 334(6054):333
- [16] Ni X, Emani N K, Kildishev A *et al.* *Science*, 2012, 335(6067): 427
- [17] Sun S, He Q, Xiao S *et al.* *Nat. Mater.*, 2012, 11(5):426
- [18] Xiao S, He Q, Qu C *et al.* *Opt. Express*, 2013, 21(22):27219
- [19] Ma H F, Cui T J. *Nat. Commun.*, 2010, 1:21
- [20] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J. *Science*, 2004, 305(5685):847
- [21] Lockyear M J, Hibbins A P, Sambles J R. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102(7):073901
- [22] Landau L D, Lifshitz E M, Pitaevskii L P. *Electrodynamics of Continuous Media 2nd edn* (Pergamon, 1984)
- [23] Sun S, Yang K Y, Wang C M *et al.* *Nano Lett.*, 2012, 12(12): 6223
- [24] Lin X Q, Cui T J, Chin J Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92 (13):131904
- [25] Paul O, Reinhard B, Krolla B *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96 (24):241110
- [26] Neu J, Krolla B, Paul O *et al.* *Opt. Express*, 2010, 18(26):27748
- [27] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z *et al.* *Nano Lett.*, 2009, 9(1): 235
- [28] Lin L, Goh X M, McGuinness L P *et al.* *Nano Lett.*, 2010, 10 (10):4111
- [29] Ma C, Liu Z. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(18):183103
- [30] Ma C, Escobar M A, Liu Z. *Phys. Rev. B*, 2011, 84(19):195142
- [31] Aieta F, Genevet P, Kats M A *et al.* *Nano Lett.*, 2012, 12(9): 4932
- [32] Li X, Xiao S, Cai B *et al.* *Opt. Lett.*, 2012, 37(23):4940
- [33] Larouche S, Tsai Y J, Tyler T *et al.* *Nat. Mater.*, 2012, 11(5):450
- [34] Chen W T, Yang K Y, Wang C M *et al.* *Nano Lett.*, 2014, 14(1): 225
- [35] Wang J, Qu S, Ma H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(20): 201104
- [36] Qu C, Xiao S, Sun S *et al.* *EPL*, 2013, 101(5):54002
- [37] Pors A, Albrektsen O, Radko I P *et al.* *Sci. Rep.*, 2013, 3:2155
- [38] Zhang X, Tian Z, Yue W *et al.* *Adv. Mater.*, 2013, 25(33):4567
- [39] Pu M, Chen P, Wang C *et al.* *AIP Advances*, 2013, 3(5):052136
- [40] Kang M, Feng T, Wang H T *et al.* *Opt. Express*, 2012, 20(14) : 15882
- [41] Xu Y, Yao K, Chen H *et al.* *EPL*, 2012, 99(4):44002
- [42] Wei Z, Cao Y, Su X *et al.* *Opt. Express*, 2013, 21(9):10739

- [43] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L *et al.* Nano Lett., 2013, 13 (2): 829
- [44] Lin J, Wu S, Li X *et al.* Appl. Phys. Express, 2013, 6(2):022004
- [45] Hu D, Wang X, Feng S *et al.* Adv. Optical Mater., 2013, 1(2): 186
- [46] Chen Y H, Huang L, Gan L *et al.* Light: Science & Appl., 2012, 1: e26
- [47] Xie Z, Wang X, Ye J *et al.* Sci. Rep., 2013, 3: 3347
- [48] Huang L, Chen X, Bai B *et al.* Light: Science & Appl., 2013, 2: e70
- [49] Lin J, Mueller J P B, Wang Q *et al.* Science, 2013, 340(6130): 331
- [50] Yin X, Ye Z, Rho J *et al.* Science, 2013, 339(6126): 1405
- [51] Zhang J, Mei Z L, Zhang W R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 103 (15): 151115
- [52] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Science, 2013, 339 (6125): 1232009
- [53] Yu N, Capasso F. Nat. Mater., 2014, 13(2): 139
- [54] 孙树林, 何琼, 肖诗逸等. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080009
- [55] Yu N, Genevet P, Aieta F *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2013, 19(3): 4700423
- [56] Zhu B O, Zhao J, Feng Y. Sci. Rep., 2013, 3: 3059
- [57] Carrasco E, Tamagnone M, Perruisseau-Carrier J. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(10): 104103
- [58] Li Z, Yu N. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(13): 131108
- [59] Zhao J, Li B, Chen Z *et al.* Sci. Rep., 2013, 3: 2537
- [60] Li Y, Liang B, Gu Z M *et al.* Sci. Rep., 2013, 3: 2546


ILOPE-2015
www.ilope-expo.com
 垂询电话: 010-8460 0344

北京国际光电产业博览会 暨
第二十届中国国际激光·光电子及光电显示产品展览会
北京·中国国际展览中心(三元桥) 2015年10月14日-16日

<p>主办单位</p> <p>中国国际展览中心集团公司 中国光学光电子行业协会</p> <p>承办单位</p> <p>中国光学光电子行业协会 中展集团北京华港展览有限公司</p>	<p>支持单位</p> <p>中国工业和信息化部 中国物理学会 北京光机产业基地 韩国光产业振兴会</p> <p>展品范围</p> <p>激光与红外产品及设备 光电材料与元件</p>	<p>中国科技部 中国兵器工业集团公司 中国图形图像学学会 财团法人光电科技工业协进会</p> <p>光电显示及照明 光学元件与材料</p>	<p>中国科学院 北京生产力促进中心 日本光产业技术振兴会 新加坡光学与光子学学会</p> <p>LED & OLED & FPD 光通讯设备</p>
---	---	--	---