

全彩显示及全息超表面的设计与应用研究

北京师范大学 李昊霖，曹杨，陈自立

（北京师范大学物理学系，北京 100875）

指导教师：陈建军 教授

摘要：超表面可以作为一种新型的信息存储与显示介质，可以利用亚波长结构的共振在正交偏振光谱中产生单一的透射或反射峰，从而显示出特定颜色；旋转结构单元引入的几何相位可以作为相位调控手段，从而实现多通道纯相位全息。本研究首先考察了多种超表面结构，并对表面浅光栅、纳米槽阵列、V形天线阵列利用 Comsol 进行了有限元仿真计算。然后，本研究以浅光栅超表面为例，设计了一套由原始图像直接生成 EBL 版图（GDS 文件）的程序，其中利用颜色匹配算法确定单元结构参数，利用 GS 算法确定单元旋转角度。

关键词：超表面，结构色，全息图

一、项目背景

在当今数字技术飞速发展的背景下，显示技术一直是不断创新的热点领域。随着对高质量、大视角、多功能全彩显示需求的日益增长，传统的显示技术逐渐显露出局限性，为此，我们着眼于超表面结构色的研究与应用。超表面结构色作为一种新兴的光学材料，吸引了广泛的关注。其独特之处在于能够产生高纯度、高饱和度的结构光，且具有更宽广的色域和卓越的对比度，同时能够在光束中携带相位和偏振信息，这为实现更加细致、复杂的图像显示和信息传递打开了崭新的方向，为全彩显示技术带来了更广阔的前景，也为我们提供了突破传统显示技术限制的契机。

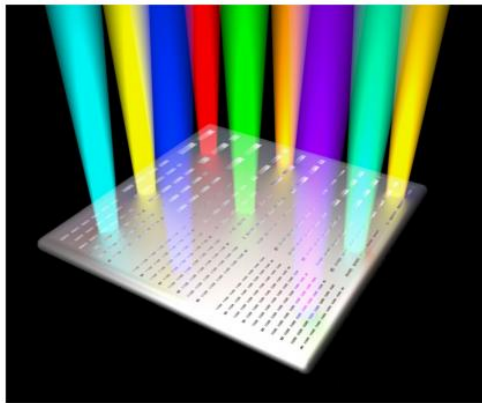


图 1 超表面产生结构光的示意图

超表面的出现克服了传统光学存在的诸多问题。传统的光学调控手段通常依赖光在传播过程中逐渐积累的振幅、相位和偏振变换，因此产生的光学器件往往具有复杂的结构和较大的体积；人们通过光学显微镜观察自然界物体的微观结构，然而由于光的波动性导致衍射极限的存在，长期以来一直无法通过光学手段观察到小于 200nm 的病毒和蛋白质。此外，光学光刻的分辨率也受到了类似的限制，阻碍了现代光电器件的集成^[1]。除了衍射极限外，传统光学还受到光波折射和反射规律的限制。根据 Snell 定律，传统的透镜系统需要曲面界面来改变光的方向。对功能越来越复杂的要求导致光学器件越来越精密、复杂，这对制造工艺提出了极为严苛的要求，成本也呈指数上升。而且，光子学和微纳光学的发展需要实现高密度集成的

微型光学仪器，传统光学仪器显然也不符合微型化、集成化的趋势。因此，人们迫切需要一种亚波长的新型光学理论来克服传统光学存在的诸多问题，超表面应运而生。

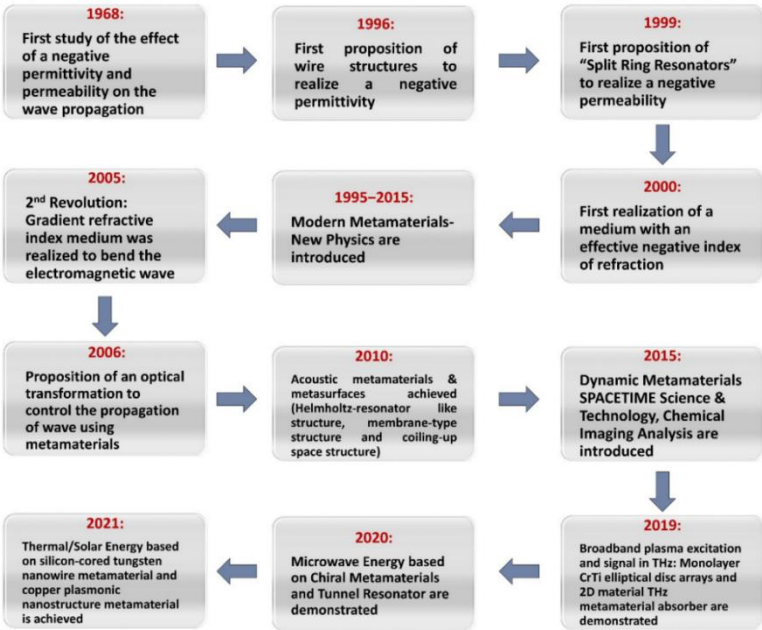


图 2. 超表面研究历程^[2]

对于超材料的科学研究历史可以追溯到 20 世纪 60 年代（图 2）。当时物理学家们开始研究金属表面的光学性质，并发现金属表面上存在表面等离子体共振（Surface Plasmon Resonance, SPR）现象，这为利用金属表面进行光学调控提供了基础。超表面利用周期或非周期性结构（被称为超原子，meta-atom）的特殊电磁响应，改变电磁场的边界条件，实现对入射电磁场的调控。超表面可以由多种材料构造，其中，金属基超表面因为其独特的电磁特性和易加工的优点而备受关注。金属基超表面也被称为等离子体超表面（plasmon metasurface），等离子体超表面可以认为是三维金属基超材料的二维对应物（图 3），后者三维的结构导致其制造工艺复杂、成本高昂，而且具有较高的能量损耗，相比之下，超表面简化的制造工艺使其受到了学界的广泛关注。人们对金属表面的光学性质进行了深入研究，并且发现可以通过精确调控金属表面的形貌和纳米结构，实现对光场的高度控制。亚波长结构的精准设计可以实现电磁波参数的灵活调控，包括但不限于波长、相位、偏振和振幅，并且可以实现多参量的同时调控。

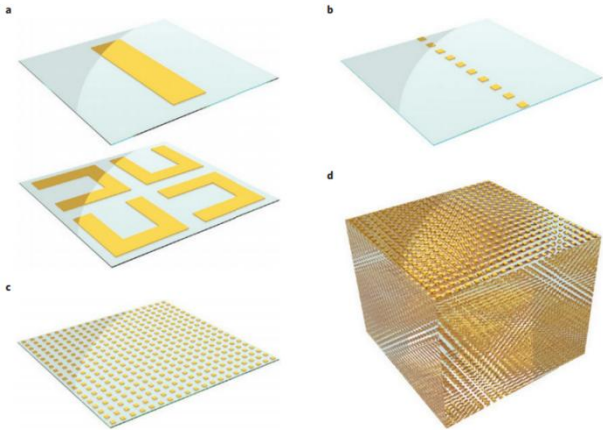


图 3. 从一维超原子到三维超材料^[3] a.两种经典超原子示意图：一个等离子体纳米棒形成的超原子和一个由四个裂环谐振器组合成的超原子 b-d.一维链(b)、二维超表面(c)和三维超材料(d)示意图

事实上，使用超表面来改变边界条件的历史要长得多。1902 年，在金属表面出现了两种重要的现象。第一个是伍德异常，它导致了表面等离子体极化激元（SPP）的发现^[4]。第二种现象是列维-奇维塔关系（Levi-Civita relation）^[5]，即亚波长厚的薄膜可以导致电磁边界条件的剧烈变化。基于这两种观测结果，超表面现在被广泛开发为功能器件，以实现相位波前工程、光谱滤波、完美的吸收和极化操作。例如，表面等离子体光刻技术是在 2004 年提出的^[6]，然后在众多研究小组的共同努力下最终在 2018 年实现实用化。2008 年，斯奈尔定律的等离子体版本建立，并于 2011 年进一步扩展到纳米天线阵列。2012 年，报道了不同类型波的转换以实现完美吸收和其他应用。研究者们不断提出新的设计方案和制备技术，开发出了一系列具有重要应用潜力的光学器件，如超透镜、光学偏振器、光学天线等。

关于超表面结构的设计种类繁多，为了便于查找和对比，对于文献中报道的其它常见结构我们以列表的形式总结在文件“文献结构总结表”中，其中包含了若干超表面结构及其基本性质，并对部分结构进行了简单综述^{[11]-[27]}。

二、超表面原理

1. 超表面的基本原理

超表面的奇异性质主要源于金属表面上存在的表面等离子体共振（Surface Plasmon Resonance, SPR）现象，即金属表面上的自由电子与入射光场相互作用，导致光场被强烈束缚在亚波长区域内，产生强烈的电磁场增强效应。对于金属纳米颗粒，其表面的电子会在外电场的驱动下发生周期性极化，往复振荡，因为粒子之间的场耦合很弱，这种模式会受到边界条件的限制而被完全束缚在颗粒表面附近，这种模式被称为局域表面等离激元（Localized surface plasmon, LSP）。而对于平面金属波导，等离子体共振可以沿金属和介质界面区域切向连续传播（图 4），并在垂直方向指数衰减，这种传播模式被称为表面等离激元（Surface plasmon polarization, SPP）。

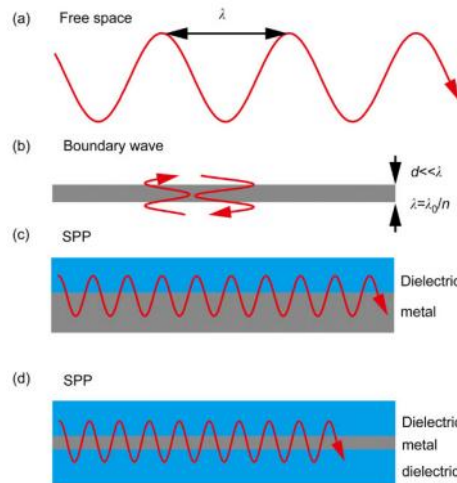


图 4. 表面等离激元示意图 a.自由空间电磁波 b.电磁波穿透金属薄膜
c-d.电磁波沿金属/介质界面传播

表面等离激元是金属和介质界面区域的一种自由电子和光子相互作用形成的电磁模式，这种类型的波沿切向表面传播，并在垂直方向上呈指数衰减。

利用麦克斯韦方程组和边界条件，可以导出表面等离激元的色散关系：

$$k_{SPP} = \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} k_0$$

该色散关系与等离子体共振的色散曲线同时绘于图 5，对于对应于低（红外）频率的小波矢量，SPP

传播常数接近于 k_0 ，在这种情况下，SPP 获得了掠入射光场的性质，也被称为索姆菲尔德-泽纳克波（Sommerfeld-Zenneck waves）。在大波矢量情况下，SPP 的频率接近特征表面等离子体频率 ω_{sp}

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_2}}$$

然而，在实际的情况下，由于损耗的存在，SPP 的波矢并不会随频率趋近于 ω_{sp} 而趋于无穷，实际的色散曲线如图 6。

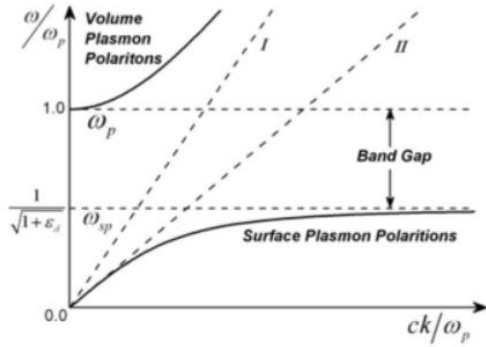


图 5. 表面等离激元、等离子体共振色散曲线（理想情况）

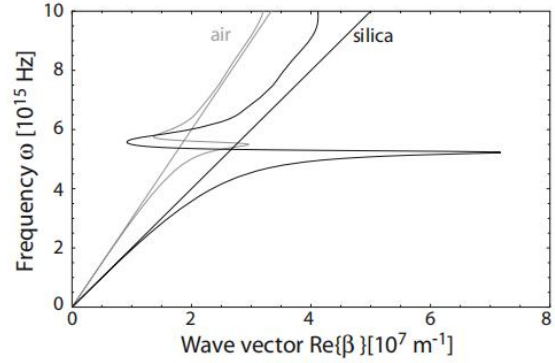


图 6. 银/空气（灰色曲线）和银/硅（黑色曲线）界面上的色散曲线^[7]（实际情况）

可以发现，两种传播模式之间存在“禁带”，这使得等离子体中自由传播的电磁振荡无法直接激发表面等离激元模式。而且自由光束也无法直接激发表面等离激元，因为 $\beta > k_0$ ，其中 k_0 是界面介电侧上光的波矢。因此，光子在 θ 入射角下沿界面动量 $k \sin \theta$ 总是小于 SPP 传播常数 β ，要实现自由电磁波对表面等离激元的直接激发，必须要跨越“禁带”实现波矢的匹配，即动量匹配。实现动量匹配主要的方式有棱镜激发、光栅激发等方式。

2. 全彩显示的基本原理

基于超表面结构的全彩显示是一种利用超表面技术来实现高分辨率、高色彩饱和度的显示技术。这种技术利用超表面的微纳结构单元来调节入射光的相位、振幅和偏振状态，从而实现对光波的精确控制，进而产生丰富的色彩和清晰的图像。

假设圆偏振光基底为 xOy ，实验室(反射表面)参考系为 uOv ，一般地，两者之间有一夹角 ζ ；反射表面各向异性，设 u 、 v 方向反射率分别为 r_u, r_v ，圆偏振光经超表面反射后有：

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{J_\zeta}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((r_u + r_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (r_u - r_v) e^{2i\sigma\zeta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right)$$

可以看到，各向异性反射表面 ($r_u \neq r_v$)，右旋圆偏振光反射后，不仅有正常反射的左旋圆偏振光（右旋偏振光正常反射是左旋偏振光），还出现了交叉偏振的右旋圆偏振光；若各向同性 ($r_u = r_v$)，则不会发生交叉偏振。显然，交叉偏振部分具有与方向角 ζ 成正比的相移，这就是几何相位。

而超表面的偏振反射率具有显著的波长依赖性，在波长满足共振条件时，沿共振方向的偏振光被强烈吸收，偏振反射率因此出现方向差异，正交偏振光因此产生。因此正交偏振光谱也具有波长依赖性，在达到某一方向的共振波长时，正交偏振光谱上会出现一个尖锐的峰，由此可能产生某一波长下的透射/反射峰，如果我们设法滤掉正常偏振光，只保留正交偏振光，我们就可以看到特定的色彩，也就产生了结构光。

据此原理，我们可以通过调节超表面的结构参数来改变共振波长，而共振波长也就决定了正交偏振光谱上峰的位置，也就调节了超表面的颜色。

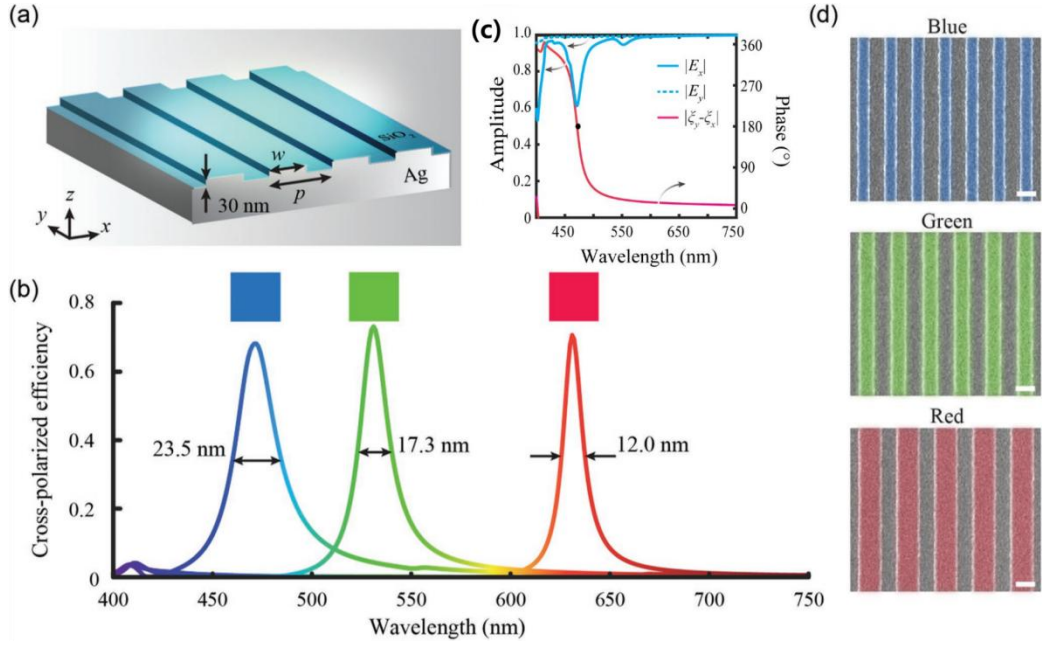


图 7 a.等离子体表面浅光栅结构示意图 b.不同结构参数的表面浅光栅的模拟交叉偏振光谱 c.仿真得到的沿 xy 轴电场的反射率及相位差 d.表面浅光栅 SEM 图

例如，对于图 7(a)所示的等离子体表面浅光栅超表面，其 x、y 方向的电磁响应如图 7(c)所示。

当表面等离激元的波长等于光栅周期时，光栅沿 x 轴产生强烈的共振吸收，而在 y 轴方向，因为没有周期性结构，所以反射率随波长变化不明显。可以看到，在共振波长下，x 方向的反射率 r_x 突然降低，导致超表面性质出现强各向异性，按照前述原理产生了交叉偏振。交叉偏振光谱如图 7(b)所示，可以看到，在共振波长上出现了尖锐的峰，也就是产生了高纯度、高亮度的结构光。需要注意的是，入射光的偏振必须在 xy 轴上均有分量，例如不平行于 xy 轴的线偏振光、圆偏振光，而且高纯度的结构光产生是在交叉偏振光谱中实现的。

3.多通道全息的基本原理

圆偏振光经超表面反射后有：

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{J_\zeta}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((r_u + r_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (r_u - r_v) e^{2i\sigma\zeta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right)$$

我们发现正交偏振光会改变 2ζ 的相位（称为几何相位），其中 ζ 为偏振光基底与实验室系（超表面系）的夹角，由于偏振光基底的选择具有任意性，所以几何相位只具有相对意义。

但同一个超表面结构产生的相位调制是一定的，并不依赖于偏振光基底的选择，这是因为超表面产生的相位调控（对正交偏振光）可以分为两大类，一类是 SPP 传播过程中相位变化的积累导致的相位调控（传播相位）；另一类是超表面的各向异性导致 SPP 传播各向异性，不同方向 SPP 相位差因此改变，由此产生的几何相位。其中第一类调控方式与传统光学相位调控方式类似，但由于 SPP 具有极短的波长，因此可以在极短的距离上实现相位的突变，从而实现光学器件的微型化和可集成化；而第二类调控方式就是几何相位。虽然这两类相位都各自依赖于偏振光基底的选取，但总的相位调制是不依赖于基底选择的。

几何相位又称潘查拉特南-贝里相位（Pancharatnam-Berry phase），其源于超表面的各向异性，是光子自旋轨道耦合的表现，也可以理解为一种由于超表面基底和偏振光基底选取不一致导致的数学相位。相位突变可以用来实现平面光学器件，如平面透镜和轨道角动量（OAM）发生器。集成的 OAM 发生器可以在高速通信中得到应用。为了提高传输效率，可以结合抗反射结构（图 8.f）。此外，合理设计超表面，可以分别独立利用沿超表面两个轴的相移，从而任意调制光的偏振态。

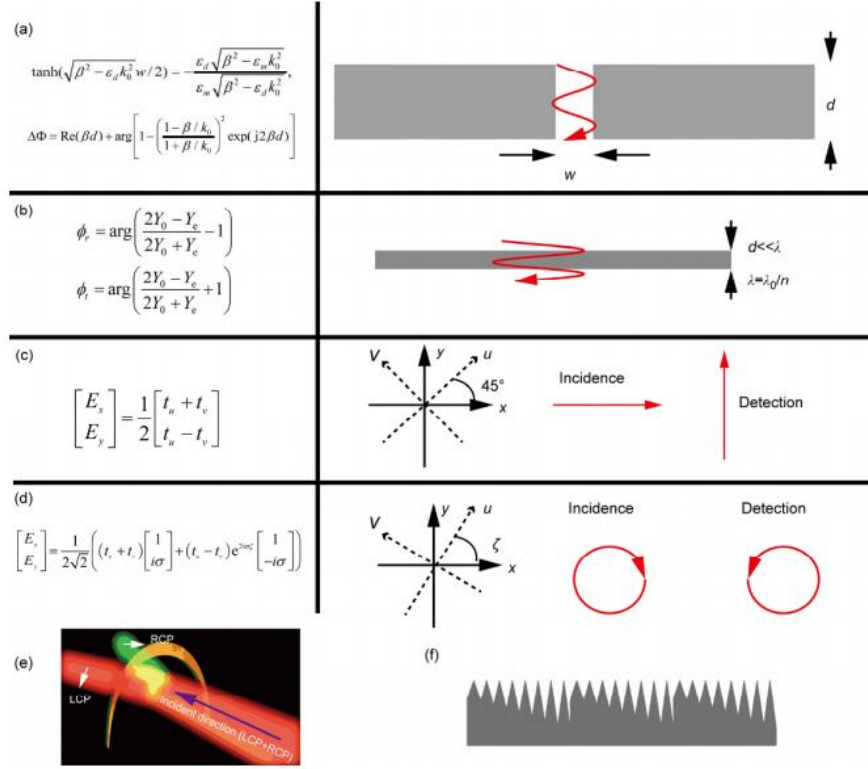


图 8. (a)(b).SPP 传播过程中相位变化的积累导致的相位调控 (c)(d).超表面的各向异性导致 SPP 传播各向异性 (e).光子自旋霍尔效应示意图 (f).一种抗反射相位调控超表面的结构

虽然对于单个超表面结构单元，我们总可以通过令 $\zeta = 0$ 来使几何相位为零，但对于多个结构单元组成的超表面，只要不同单元的旋转方向不同，就不可能使全部单元产生的几何相位均为零。因此，可以通过调节超表面结构单元的旋转角度来调控几何相位。当表面结构旋转 ξ 时，就会使正交偏振光产生 $2\sigma\xi$ 的几何相位 ($\sigma = \pm 1$ ，表示左旋或右旋偏振光)。通过超表面结构的旋转排布，可以使结构光携带相位分布信息，此时超表面就相当于一个相位型全息图，在相干光源的照明下可以实现全息显示（图 9）。

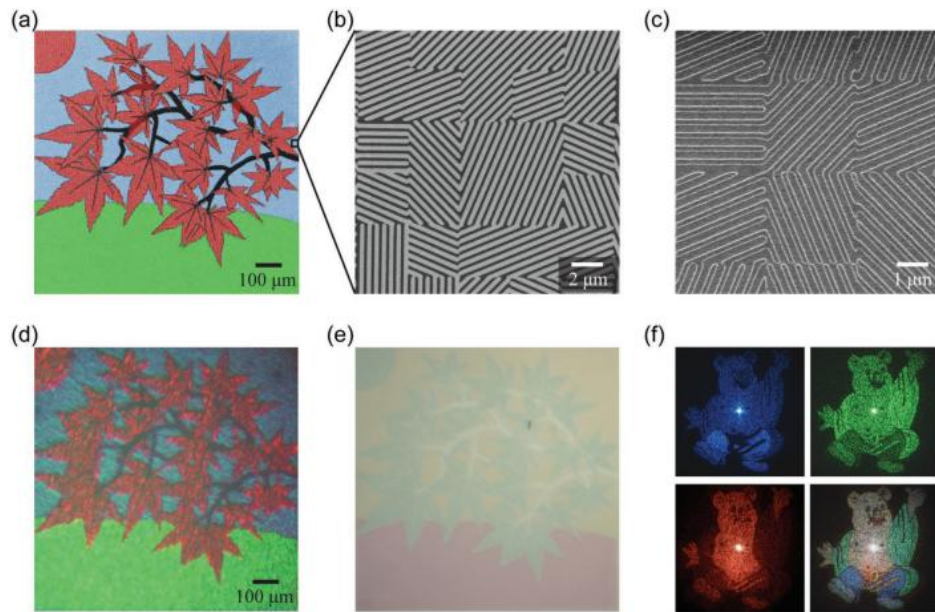


图 9 a.超表面实现的全息显示效果 b.c.超表面的 SEM 图 d.e.不同观察方式下超表面的色彩 f.相干光照明下实现的多通道全息图显示

而且，由于超表面是由不同共振波长的单元构成的，所以某一波长的相干光只能激发一种结构单元的共振，使他们产生携带相位信息的正交偏振光。所以，我们可以给不同种类的结构单元写入不同的全息相位信息，这样在不同波长激光的照射下就能产生不同的相位图，也就是实现了多通道全息。

例如图 9，超表面是由红绿蓝三种结构单元构成的，所以可以给三种结构单元分别写入相位信息，这样在红光、绿光、蓝光的照射下就可以显示出不同的图像，超表面就构成了三通道全息图。图 9(f)利用三个通道分别写入了一张彩色图片的 RGB 信息，因此在三个波长的相干光同时照射时，三个通道同时被打开，三幅单色图像叠加为彩色 RGB 图，这就实现了彩色全息。

三、超表面单元仿真

我们选取了三种最常见的超表面结构进行了仿真模拟，使用的有限元仿真工具为 Comsol，该软件使用有限元方法（Finite Element Method, FEM）求解麦克斯韦方程组，进而得到特定边界条件设置下全空间的电磁场分布，从而获得超表面的电磁响应性质。

在使用 Comsol 时，一般按照以下步骤进行超表面仿真操作：

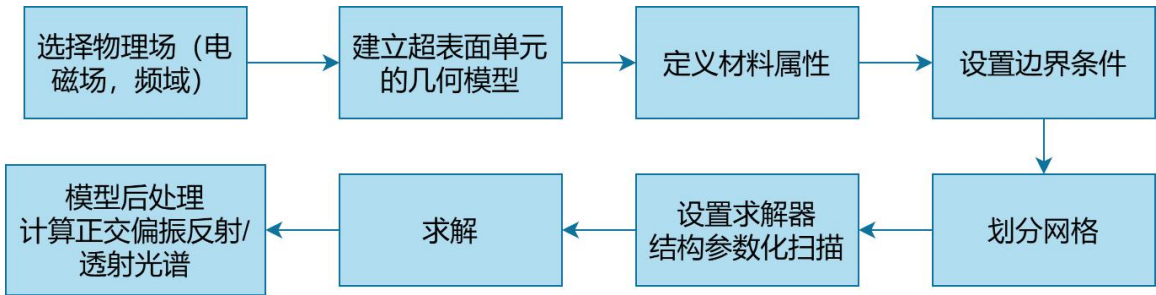


图 10 超表面单元仿真操作步骤

1. 金属表面浅光栅

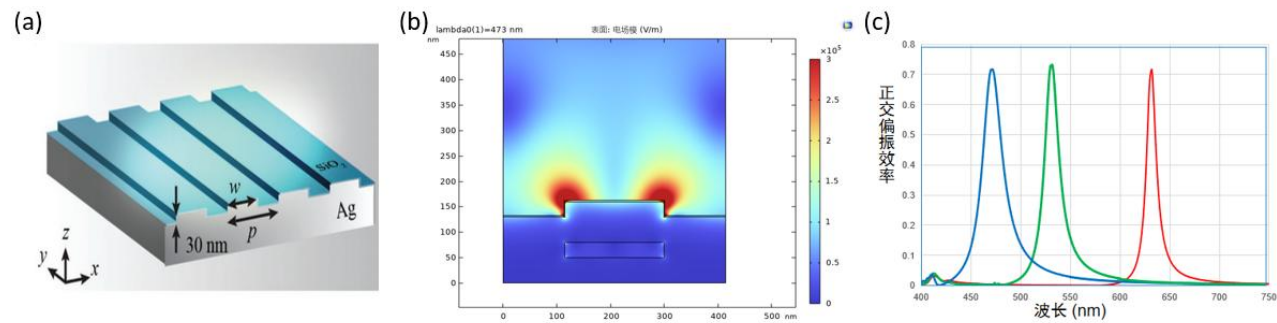


图 11 为表面浅光栅（Plasmonic Shallow Gratings, PSGs）结构的仿真，图(a)为结构示意图，(b)为模拟得到的二维电场模切面图，(c)为不同结构参数的 PSGs 的反射交叉偏振光谱（blue: $p = 414.3 \text{ nm}$, $w = 185 \text{ nm}$; green: $p = 483.3 \text{ nm}$, $w = 240 \text{ nm}$; red: $p = 580 \text{ nm}$, $w = 380 \text{ nm}$ ）

对于常见的光栅，因为其周期大于波长，会出现高阶的衍射峰；但 PSGs 超表面的光栅周期小于波长，不满足光栅公式中高阶衍射的产生条件，因此只有零级衍射峰。对于圆偏振光入射，要产生正交偏振反射光的条件是沿光栅周期方向产生共振，即光栅表面等离子激元的波长等于光栅周期，这时沿光栅周期方向偏振的吸收率增大，产生了两个正交偏振方向反射率的各向异性，进而导致了正交偏振反射光谱产生一个尖锐的峰（图 11(c)）。依此原理，我们可以通过改变光栅周期来调节共振波长，进而调节正交偏振反射峰的位置。

表面浅光栅结构相对简单，易加工，而且结构的各向异性强，正交偏振反射效率高（ $>70\%$ ），单色

性好（半高全宽~20 nm），因而是一种理想的超表面结构单元。

2. 金属纳米槽阵列

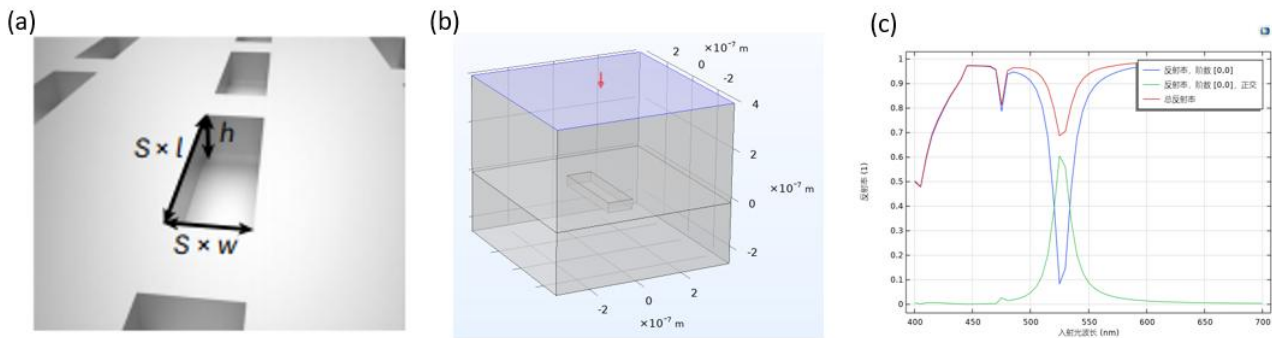


图 12 为纳米槽阵列的仿真，图(a)为结构示意图，(b)建立的模型图，(c)为不同偏振的反射光谱图

纳米槽阵列可看做一种浅光栅的衍生结构，当浅光栅的沟槽部位被周期性的截断填充时，浅光栅就变为了纳米槽阵列，如图 12(a)。所以纳米槽阵列产生正交偏振的原理与表面浅光栅基本相同，可以预测两者的正交偏振反射谱也具有相似的特征。我们使用表面浅光栅中图 12(c)绿色反射峰对应的参数进行纳米槽阵列的仿真，结果如图 12(c)所示，可见反射峰的形态、波长均与图 12(c)绿色反射峰高度相似。

但是可以看到纳米槽阵列的正交偏振效率仅为 60%，低于浅光栅的效率（>70%），这可以解释为光栅沟槽的截断导致沿沟槽方向和垂直沟槽方向的结构差异性下降，从而导致两个正交方向的共振特性相似性增强，因此正交偏振效率降低。

虽然纳米槽阵列正交偏振效率有所下降，但是槽阵列的结构使得每个结构单元比浅光栅更小，从而可以实现更灵活、更精细、更复杂的光场调控，使得显示面可以更微型化，信息密度更大，分辨率更高。

3. V 形纳米天线阵列

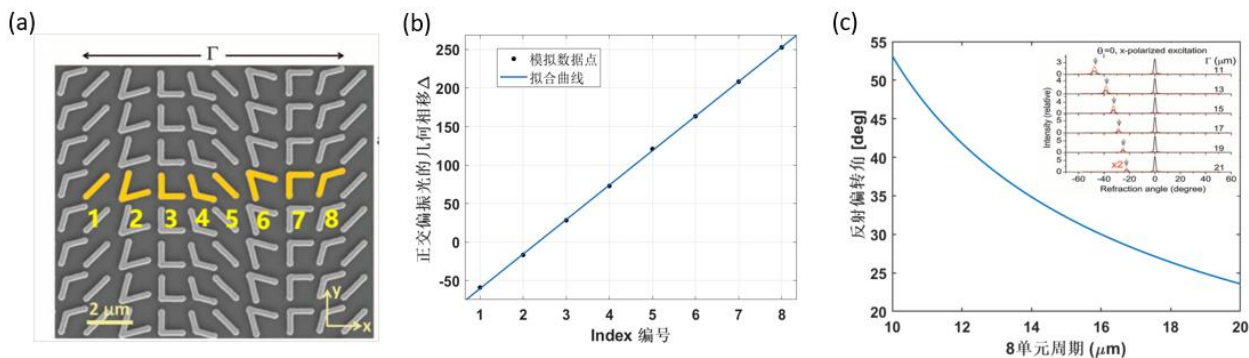


图 13 为 V 形纳米天线阵列，(a)为文献报导的反射方向偏折超表面；(b)为结构 1-8 分别模拟得到的相移，这导致反射光在超表面处形成一相位梯度，反射方向由广义斯涅耳定律描述；(c)为不同周期产生的反射光偏转角，插图文献报导的偏转，与我们的仿真结果相同。

V 形天线是一种常见的天线类型，通常用于无线通信和射频应用中。它的设计类似于一个“V”形，其中两个边缘相交于一个尖端，并且通常与地面或者地平面平行放置。在超表面兴起后，这一传统的宏观天线也借助微纳加工技术成为了一种常见的亚波长超表面结构单元。V 形天线的电磁理论研究较为完善，因此可以利用电磁理论直接计算 V 形天线的电场分布，这样，在超表面设计的时候可以直接理论算出需要的结构参数，避免了有限元仿真这一费时费力的步骤，V 形天线的理论分析详见 Jackson 经典电动力学^[8]。

图 13(a)利用旋转 V 形天线产生的几何相位在超表面上引入了相位梯度，根据广义斯涅耳定律的描述，正交偏振反射光的反射方向将偏离几何反射方向。我们通过分别仿真结构单元 1-8，分别计算了它们的几何相移，绘于图 13(b)，可见形成了稳定的相位梯度。可以通过控制单元周期来控制相位梯度的大小，进而控制偏折方向，如图 13(c)所示，插图文献报导的不同周期对应的折射偏转，与我们计算得到的结果一致。

V形天线的主要可调几何参数有双臂长度、两臂夹角，这种结构比纳米槽和浅光栅结构更为灵活，电磁响应相对复杂，可以实现更复杂的调控目的和更高的正交偏振效率，并且结构单元更小，更容易大规模集成。但是V形天线结构更为复杂，在加工过程中具有挑战，往往加工误差导致的结构偏差会使其性能发生异变，限制了V形天线更大规模的应用。

四、超表面设计

根据前文的理论分析，我们明确了超表面颜色由结构决定的共振波长确定，而多通道相位型全息图由结构单元旋转产生的几何相位确定。我们依据此原理设计了一套生成电子束光刻(e-beam lithography; EBL)版图的程序，使研究人员和超表面设计者可以直接由原始图像生成超表面的电子束光刻版图。该程序的流程图如图14所示。

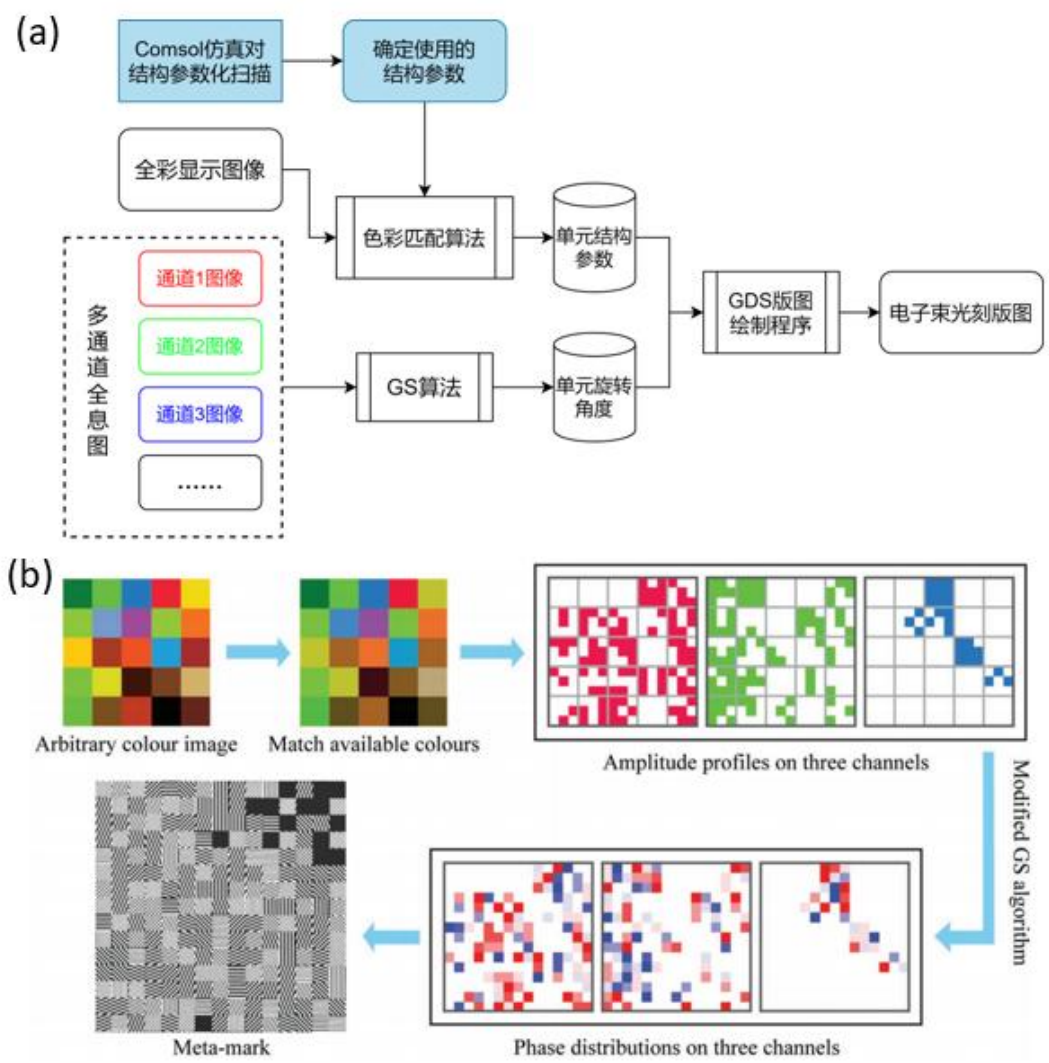


图 14: (a)程序流程图, (b)设计流程示意图^[9]

1. 色彩匹配算法

超表面利用结构共振产生特定波长的正交偏振光，因而产生了色彩。为了降低全息图不同通道之间的串扰以及加工的方便，往往使用几种特定的参数产生色彩，并利用混色原理混合出更多的颜色。例如，我们使用对应红、绿、蓝三种颜色的结构参数构成超表面，那么对应的就是三通道全息图。如图14(b)所示，在颜色混合时，我们将 N^2 个结构单元组成一个大的像素单元，对于某一种颜色，我们可以将其按RGB分

解，按 R:G:B 的比例确定三种结构的比例，然后按亮度（RGB 的绝对值）确定三种结构的绝对数量。

N 应为不小于 3 的整数，且 N 越大，颜色匹配越准确，图片失真率越低；但当 N 过大时，像素点过大导致分辨率降低。

2. GS (Gerchberg-Saxton) 算法

Gerchberg-Saxton (GS) 算法是一种用于相位恢复和重构的迭代算法，常用于数字全息术和相位恢复问题。实际上，全息术要求我们只利用纯相位调制恢复物光波前，这一近似问题没有直接的精确求解方法，但可以使用迭代优化的方式得到近似的解。

GS 算法的目标是通过迭代过程逐渐优化相位估计，以最大程度地匹配已知的幅度信息和测量的干涉图案。通过多次迭代，GS 算法可以在幅度已知的情况下，逐步恢复出光波的复杂相位分布，从而实现高质量的图像重构。这一算法的收敛性在 1982 年已由 Fienup 证明^[10]。GS 算法流程如图：

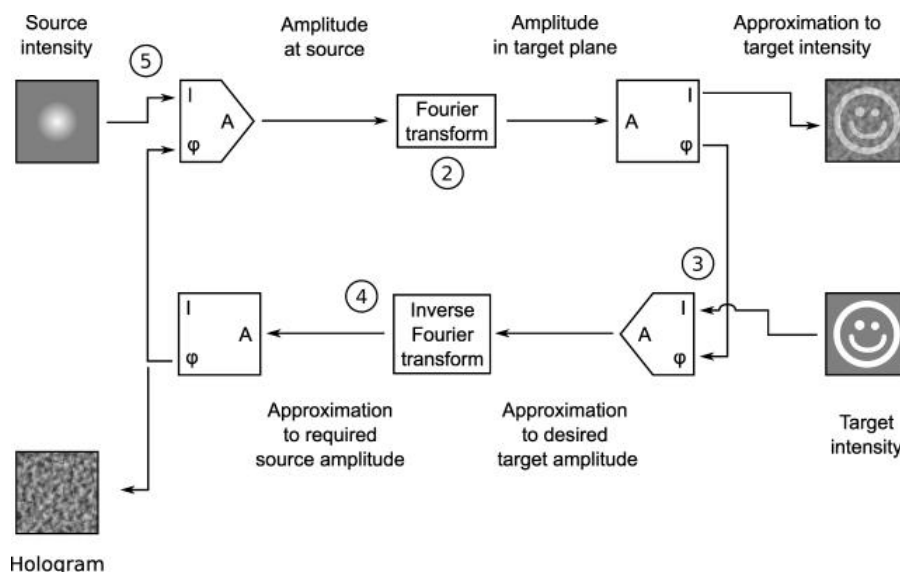


图 15 相位型全息 GS 算法流程图

由于超表面单元旋转 ζ 产生的几何相位为 2ζ ，所以计算得到纯相位全息图 $\mathcal{H}(x,y)$ 后， $\mathcal{H}(x,y)/2$ 即为各个单元的旋转角。由于超表面是由不同共振波长的单元构成的，所以某一波长的相干光只能激发一种结构单元的共振，使他们产生携带相位信息的正交偏振光。所以，我们可以给不同种类的结构单元写入不同的全息相位信息，这样在不同波长激光的照射下就能产生不同的相位图，也就是实现了多通道全息。

但由于常用的 GS 算法是用于计算连续的纯相位全息图，而某一波长下激发的结构单元并不连续，所以最终生成的纯相位全息图也不连续，为了验证 GS 算法在不连续全息图中的适用性，我们进行了如图 16 模拟验证，测试了红光结构单元的全息能力，可以发现在不连续的情况下 GS 算法仍具有适用性，但由于部分相位面的缺失，会导致其亮度下降。

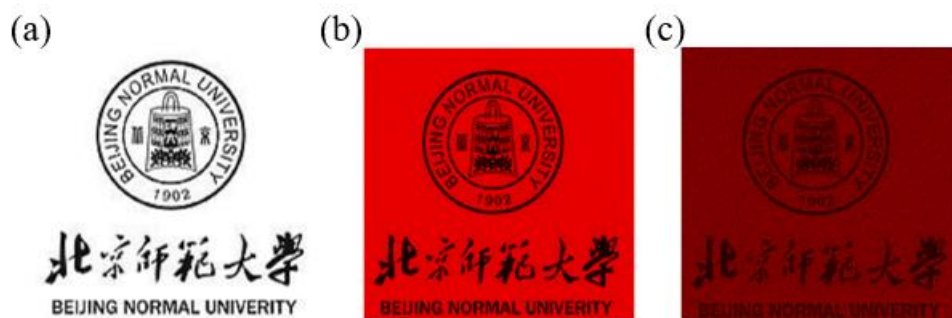


图 16：不连续相位面的 GS 算法比较图 (a)原始图像，(b)连续相位面上 GS 算法的全息重构图
(c)非连续相位面上 GS 算法的全息重构图

3. 程序综合测试

利用颜色匹配算法获得单元的结构参数，GS 算法获得单元的旋转角度，然后我们使用开源的 Matlab GDS Photonics Toolbox 和 KLayout 工具设计大规模超表面结构版图，最终测试如图 17、图 18 所示。

可以发现，全彩显示图的失真程度要高于彩色全息图，这是因为对于全彩显示图，一个超表面单元只能显示一种色彩，而复杂的色彩是由三种基本结构单元不重叠的组合而成的；但对于全息图，成像面上的一个像素点可被多个通道成像，即可显示多种颜色的混合，所以全息图的色彩可以由三种基色交错重叠的组合而成，色彩混合自由度更高。因此相比于利用共振波长的全彩图，利用几何相位的彩色全息图是一种更好的彩色图像存储方式。

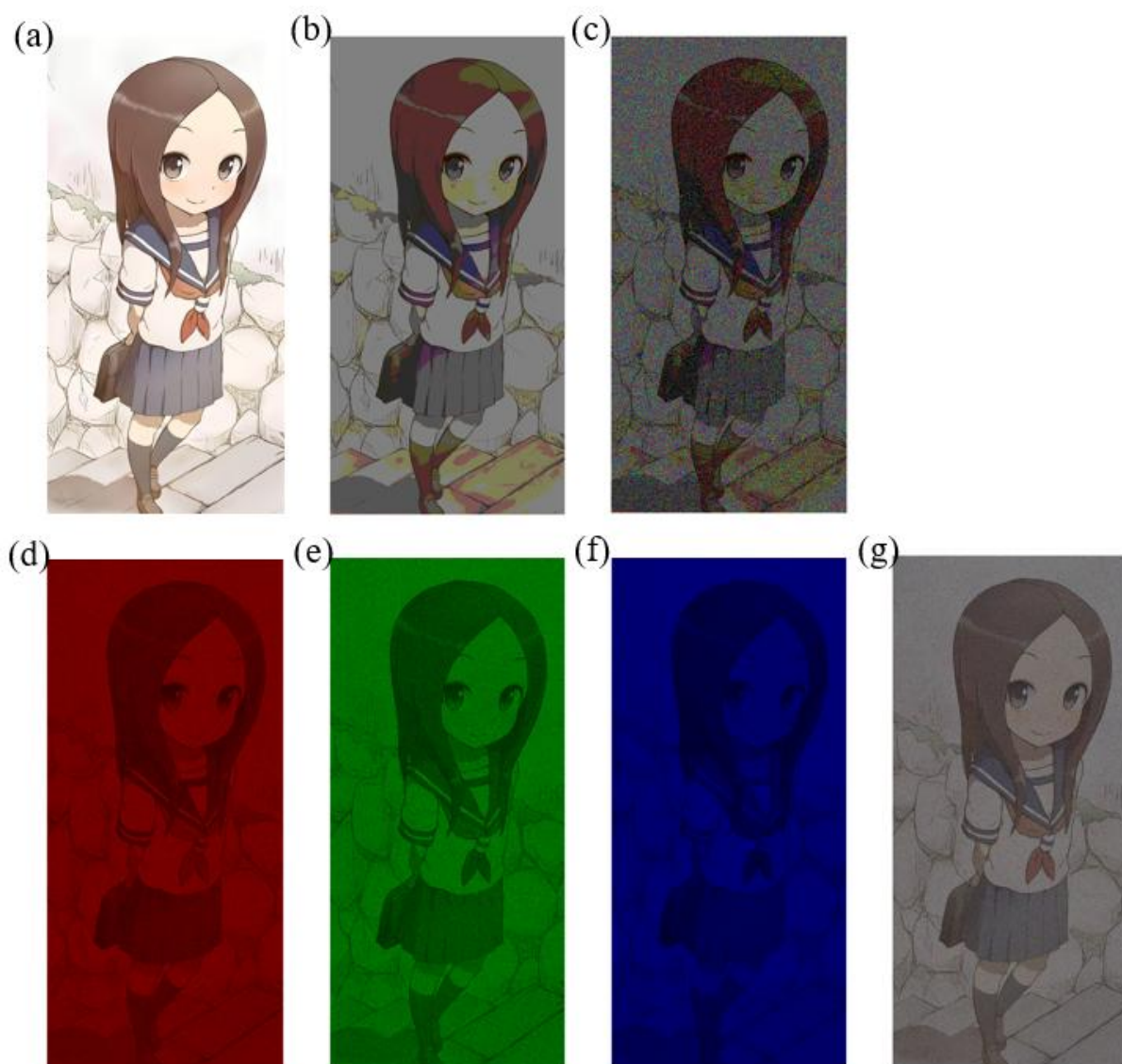


图 17：程序测试图；(a)为全彩显示和多通道全息的原图；(b)为超表面颜色匹配后的全彩显示图；(c)为超表面每个结构单元的色彩组合图；(d)-(f)为红、绿、蓝三通道全息图，它们分别载入了原图的 RGB 信息；(g)为三种波长的光同时照射时的彩色全息图像

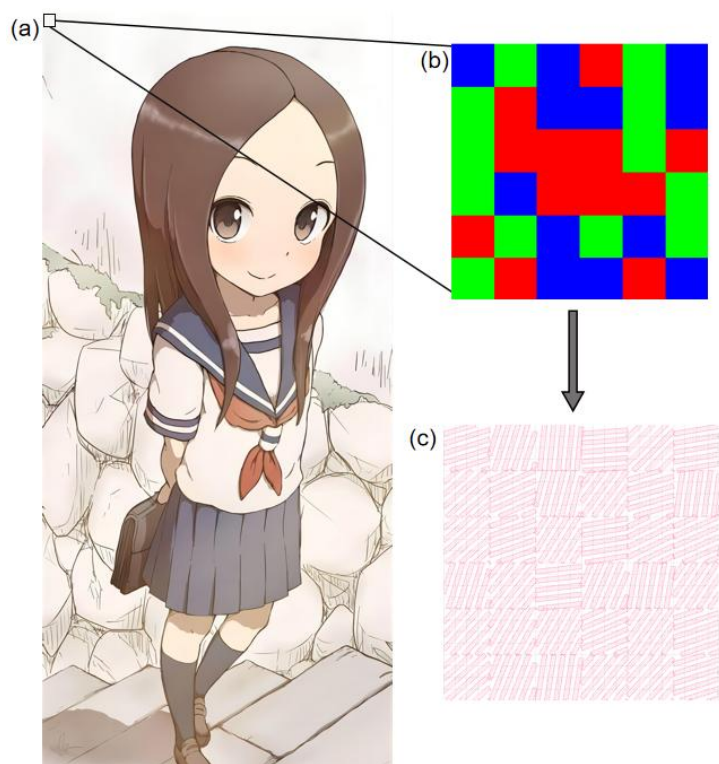


图 18:超表面局部色彩及结构图; (a)全彩显示及多通道全息的原图;
(b)超表面局部色彩; (c)超表面局部结构图, 绘制的 GDS 版图

五、总结与展望

在本研究中, 我们通过对多种超表面结构的仿真计算和理论分析, 对常见超表面的性质进行了验证性计算, 重点关注了正交偏振反射/透射峰的波长、高度和半高全宽, 这分别决定了色彩单元的颜色、效率以及单色性, 并对不同结构进行了总结与比较。

然后, 我们设计了一套用于全彩显示和多通道全息的超表面设计算法, 通过输入要显示的图像和各个全息通道的图像, 可以直接生成用于电子束光刻 (e-beam lithography; EBL) 的 GDS 版图。该算法分别通过我们自行设计的色彩匹配算法和改进的 GS 算法实现全彩显示和多通道全息图的处理, 将目标图像转化为超表面单元的结构参数, 然后利用 Matlab GDS Photonics Toolbox 生成完整的 GDS 版图。这为进行超表面设计的工作者提供了极大的便捷, 而且可以通过简单的更改程序实现其他结构的超表面设计和更多通道的全息。

目前算法的版图生成效率较低, 而且是以表面浅光栅超表面为例, 下一步需提升算法的效率、灵活性和可扩展性, 可以很方便的设计其他类型的超表面, 最终期望形成一个全流程的工具箱。

我们目前设计的超表面完全依赖于表面亚波长结构, 缺乏灵活性和可调谐性, 因此下一步我们将探索动态调控超表面的理论与技术, 目前文献报导的超表面动态调控手段主要有热调谐、电调谐、光调谐、化学调谐、机械调谐。动态可调谐超表面代表了超表面技术的一项重要进步, 它与传统超表面相比具有显著的优势, 其灵活性和可调性使其能够根据实时需求调整其性能, 因而拥有更广泛的功能性, 为未来的通信和传感器系统带来了更加灵活、高效的解决方案。

参考文献:

- [1] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58: 1-18.
- [2] Ali A, Mitra A, Aïssa B. Metamaterials and metasurfaces: A review from the perspectives of materials, mechanisms and advanced metadevices[J]. Nanomaterials, 2022, 12(6): 1027.
- [3] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. Nature photonics, 2014, 8(12): 889-898
- [4] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. Proc Phys Soc London, 1902, 18: 269
- [5] Senior T. Approximate boundary conditions. IEEE Trans Antennas Propag, 1981, 29: 826–829
- [6] Luo X, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique. Appl Phys Lett, 2004, 84: 4780–4782
- [7] asmonics: fundamentals and applications[M]. New York: springer, 2007.
- [8] John David Jackson, 朱培豫.经典电动力学[M].第二版.北京:人民教育出版社,1980:354-359.
- [9] Simultaneous Full-Color Printing and Holography Enabled by Centimeter-Scale Plasmonic Metasurfaces Fei Zhang, Mingbo Pu, Ping Gao, Jinjin Jin, Xiong Li, Yinghui Guo, Xiaoliang Ma, Jun Luo, Honglin Yu, and Xiangang Luo*
- [10] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Applied optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [11] Cong, Longqing, et al. "All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting." Light: Science & Applications 7.1 (2018): 28.
- [12] Baraldi, Giorgio, et al. "Self-Assembled Nanostructured Photonic-Plasmonic Metasurfaces for High-Resolution Optical Thermometry." Advanced Materials Interfaces 5.12 (2018): 1800241.
- [13] 罗蒙. "一种产生涡旋光束的勾型阵列超表面结构设计." Laser & Optoelectronics Progress 58.1 (2021): 108001-1.
- [14] 林鹤, et al. "宽光谱广角蛾眼抗反射超表面结构设计分析." Chinese Journal of Lasers 46.1 (2019): 113002-1.
- [15] 刘慧敏, 陈德利, and 孙晓红. "基于梯形结构的超表面透镜特性." Laser & Optoelectronics Progress 59.17 (2022): 1722003.
- [16] 宋志, et al. "反射型光变色超表面滤光结构." Acta Optica Sinica 41.20 (2021): 2023001.
- [17] Zhang, Jihua, et al. "Plasmonic metasurfaces with 42.3% transmission efficiency in the visible." Light: Science & Applications 8.1 (2019): 53.
- [18] Liu, Jie-Tao, and Zhi Liu. "Robust tunable plasmon induced transparency in coupled-resonance finite array of metasurface nanostructure." Scientific Reports 11.1 (2021): 1221.
- [19] Qian, Qinyu, et al. "None sharp corner localized surface plasmons resonance based ultrathin metasurface single layer quarter wave plate." Scientific Reports 11.1 (2021): 8956.
- [20] Yue, Wenjing, et al. "Subtractive color filters based on a silicon-aluminum hybrid-nanodisk metasurface enabling enhanced color purity." Scientific reports 6.1 (2016): 29756.
- [21] Smalley, Joseph ST, et al. "Subwavelength pixelated CMOS color sensors based on anti-Hermitian metasurface." Nature communications 11.1 (2020): 3916.
- [22] Gao, Renxian, et al. "Gigahertz optoacoustic vibration in Sub-5 nm tip-supported nano-optomechanical metasurface." Nature Communications 14.1 (2023): 485.
- [23] Kim, Ju Young, et al. "Highly tunable refractive index visible-light metasurface from block copolymer self-assembly." Nature communications 7.1 (2016): 12911.
- [24] Kim, Inki, et al. "Pixelated bifunctional metasurface-driven dynamic vectorial holographic color prints for photonic security platform." Nature Communications 12.1 (2021): 3614.
- [25] Su, Hang, et al. "Liquid-crystal-based electrically tuned electromagnetically induced transparency metasurface switch." Scientific reports 7.1 (2017): 17378.
- [26] Khaidarov, Egor, et al. "Large-scale vivid metasurface color printing using advanced 12-in. immersion photolithography." Scientific Reports 12.1 (2022): 14044.
- [27] Dai, Chenjie, et al. "Switchable unidirectional emissions from hydrogel gratings with integrated carbon quantum dots." Nature

