Arxiv 第1卷，第1期，第1–21页，2022年
https://doi.org/xxxxxx/xxxx-xxx-xxx-xxxx

arXiv:2301.00593v1 [physics.app-ph] 2 Jan 2023

原始文章

可重构超表面：系统分类与最新进展

Changhao Liu[1,2], Fan Yang[1,2], Shenheng Xu[1,2], 和 Maokun Li[1,2]

1. *D*电子工程系，清华大学，北京，中国，邮编 *100084*。
2. *B*北京信息科学技术国家研究中心（*BNRist*），北京，邮编 *100084*，中国 *a.*

通讯作者：Fan Yang；电子邮箱：fan yang@tsinghua.edu.cn。收稿日期：2022年3月22日；录用日期：2022年3月22日；发表日期：2022年3月22日。版权所有 © 2022 C. Liu等。本文是根据知识共享署名许可协议（CC BY 4.0）发表的金色开放获取文章。

摘要—鉴于理论、设计、制造和应用的快速发展，超表面（MTS）已成为微波、太赫兹和光学频段的新兴研究前沿。可重构超表面（R-MTS）能够以前所未有的灵活性动态调制电磁（EM）波，从而在近年来掀起了巨大的研究热潮。大量具有强大能力和多种功能的可重构超表面（R-MTS）不断涌现。针对电磁波的五个维度，本文提出了一个统一模型，用于描述可重构超表面（R-MTS）、电磁波和电磁信息之间的相互作用，并提出信息比特分配策略，以系统地划分不同类型的可重构超表面（R-MTS）。作为可重构超表面的最新进展，本文分别详细综述了操控不同波维度的1位和2比特单元。最后，本文讨论了可重构超表面的未来研究趋势。希望具有多种维度和功能的可重构超表面（R-MTS）能够推动下一代通信、探测、传感、成像和计算应用的发展。

关键词— 天线、电磁表面、电磁波、信息比特、信息超表面、超表面、多维、多功能、可重构、反射阵列、开关、透射阵列。

I. 引言

电磁（EM）波是现代社会的基石。为操控电磁波，人们发明并在数十年间持续研究超表面（MTS）——一种由超薄亚波长单元构成的人造阵列。与传统操控电磁波的体器件相比，超表面能够以无与伦比的自由度操控多维电磁波，具有成本低、剖面低、重量轻、效率高且易于制造等显著优势。因此，超表面如今吸引了研究人员的极大关注，围绕超表面的应用也正经历爆发式增长，例如高性能天线 [1], 用于降低雷达散射截面（RCS）的天线罩 [2],隐形斗篷 [3], 全息图 [4, 5], 超薄透镜 [6],等等。

可重构超表面（R-MTS）由传统超表面发展而来，其每个单元都集成了可调材料，因此能够动态控制电磁波。向 R-MTS 施加输入激励，可以调节电磁波与其相遇后的散射图样。研究人员提出了多种 R-MTS，能够以可重构的方式调节电磁波的不同维度。此外，一些具有复用功能的先进原型也相继问世并集成于同一个 R-MTS 上，这表明 R-MTS 研究正朝着多维度和多功能方向发展。

数字可重构超表面作为一种可重构编码超表面 [7], , 掀起了巨大的研究热潮。在超表面上加载由离散控制信号驱动的集总开关，相较于传统模拟可重构超表面具有诸多优势，包括成本低、易于操控、可扩展性强、可靠性高，以及与信息世界兼容。因此，本文主要聚焦于以信息比特为特征的数字可重构超表面。

数字可重构超表面不仅能够塑造物理电磁波并引导电磁能流，还能调制入射波并生成信息。信息加载在电磁波上，并根据电磁波不同的维度呈现多种形式。因此，可重构超表面具备了更多功能和能力，能够操控电磁波的多个维度，这也推动了可重构超表面研究的蓬勃发展。

凭借巨大优势和革命性应用，各种功能的可重构超表面正不断涌现。然而，与其功能相对应的各种术语也随之出现，使可重构超表面研究的架构显得复杂而混乱。因此，

亟需对可重构超表面进行系统分类。本文基于电磁波的五个维度，提出可重构超表面的统一数学模型，用以描述可重构超表面、电磁波与电磁信息之间的相互作用；进而提出一种称为信息分配策略的方法，尝试在统一的术语体系下重新梳理这些可重构超表面。基于这一系统分类，本文在同一术语体系下综述了可重构超表面的最新进展。这一策略有助于构建表面电磁学理论 [8]。希望本文能全面呈现可重构超表面、电磁波、电磁信息及其相互作用，并激发研究人员探索可重构超表面的更多奇妙功能。

本文综述的组织结构如下。首先，我们重点关注电磁波、电磁信息与可重构超表面之间的相互作用，并在第2节提出一种信息分配策略。随后，在信息分配框架下，第3节综述不同形式的1比特分配单元。第4节延续这一观点，主要综述2位分配单元。在第5节中，我们讨论可重构超表面的未来发展趋势，并概述一些挑战。最后，在第6节中给出结论。

II. 信息分配策略

1. 电磁波的维度

首先，有必要回顾平面电磁波的维度。平面电磁波可以用以下公式进行数学描述

$$\vec{E}(t,\vec{r}) = E_0 e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi)}|p\rangle. \tag{1}$$

该公式包含平面电磁波的五个维度：$\vec{}$相位（φ）、振幅（E_0）、偏振（$|p\rangle$）、方向（k）$\vec{}$和频率（ω）。需要注意的是，场具有偏振，因此 E 是一个向量，同时也是空间（$\vec{r}$）和时间（t）的函数。

2. 可重构超表面、波与信息之间的相互作用

要理解可重构超表面的功能，首先从物理角度进行阐释。当电磁波遇到可重构超表面时，其上的每个单元都会散射局部电磁波。随后，散射电磁波在自由空间中传播。将每个局部散射电磁波叠加后，接收器便能获得最终的电磁响应。可重构超表面能够在五个维度上动态操控电磁波。因此，可重构超表面能够动态控制波与超表面之间的相互作用。

从信息的角度来看，可以对可重构超表面的功能获得另一种理解。本综述主要讨论数字信息。数字信息以比特为特征，是现代世界的基础。与模拟信息相比，数字信息更加稳健、快速、成本低且易于处理，如今也变得愈发重要。要在自由空间中生成并传输数字电磁信息，作为物理信息媒介的电磁波不可或缺。换言之，电磁波承载着电磁信息。由于电磁波具有五个维度，电磁信息也相应地具有五个维度。此外，电磁波的每个维度都可以分别承载电磁信息。可重构超表面是为操控电磁波而发明的，因此，利用可重构超表面操控电磁波，就是对电磁信息进行调制。由于电磁信息和电磁波都具有五个维度，可重构超表面也必须支持对电磁信息五个维度进行调制的功能。因此，这类可重构超表面属于多维超表面。图 1 展示了可重构超表面、电磁波和电磁信息之间的相互作用，这些相互作用由电磁维度联系起来。

电磁单元构成可重构超表面，而可调材料使电磁单元能够重构。因此，调制数字电磁信息的关键在于设计采用可调材料的电磁单元。由于要生成的信息是离散的数字信息，调谐材料被指定为数字开关，用于生成单元的离散状态；在物理世界中，这些状态也相应地以比特来表征。与一般的可调材料相比，数字开关成本低、易于集成、易于控制，且与数字信息兼容。因此，采用数字开关的可重构超表面近年来吸引了大量研究关注。

从信息的角度来看，可重构超表面能够动态控制信息超表面之间的相互作用。可重构超表面不仅能操控物理电磁波，还能生成和调制电磁信息。可重构超表面连接了物理世界与信息世界，这种超表面称为信息超表面 [9]。

3. 可重构超表面的数学模型

在此，我们提出可重构超表面的数学模型，用于描述可重构超表面、电磁波与电磁信息之间的相互作用。假设一个可重构超表面由 M 个单元组成。当电磁波遇到可重构超表面时，散射波可表示为以下公式

$$\vec{E}^{sca}(t,\vec{r}) = \sum_{i=1}^{M} \mathbb{P}_i(\vec{r}) \cdot \mathbb{M}_i(t,\vec{r},R_i) \cdot \vec{E}_i^{inc}(t,\vec{r}_i), \tag{2}$$

其中，inc 表示入射波，sca 表示散射波。$\vec{r}$ 是接收器的位置，$\vec{r}_i$ 是第 i个单元的位置。此处，$\vec{E}_i^{inc}$是第 i个单元处的入射波。请注意，入射波不一定是平面波，但假设在每个单元的小局部区域内，入射波为平面波。根据公式 (1)，$\vec{E}_i^{inc}$可表示为

$$\vec{E}_i^{inc}(t,\vec{r}_i) = E_{0i}^{inc} e^{j(\omega_i^{inc} t - \vec{k}_i^{inc}\cdot\vec{r}_i + \varphi_i^{inc})}|p_i^{inc}\rangle, \tag{3}$$

各位置单元的入射维度取值不同。

$\mathbb{M}_i(t,\ \vec{r},\ R_i)$ 是入射波的第 i 个单元调制矩阵，该符号

$$R_i = (\vec{E}_i^{inc}, \mathrm{Switch_i}) \tag{4}$$

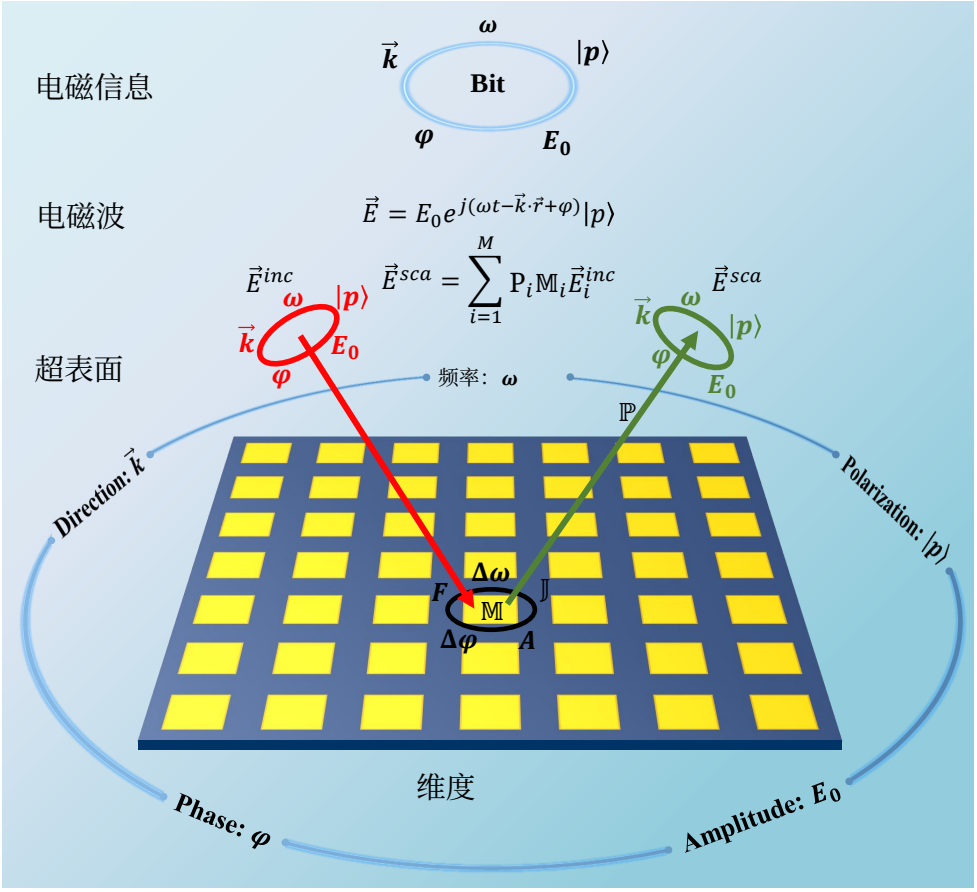


图1 信息分配策略以及电磁信息、电磁波和可重构超表面之间相互作用的示意图，它们通过电磁维度相互关联。由于电磁波具有五个维度，因此可以将信息比特分配到这些维度上。当包含五个维度的入射电磁波遇到可重构超表面时，每个单元都会通过调制矩阵 $\mathbb{M}$ 对其进行调制；调制矩阵还会操控这五个电磁维度，并将电磁信息加载到电磁波上。在自由空间传播后，远场中的总散射波是各单元散射波的叠加。总之，待传输的信息被分配到散射电磁波的各个维度上，并由可重构超表面进行动态调制。

用于表示各单元的响应。 R_i 包含电磁波的入射维度以及由开关决定的单元配置。我们将前者称为激励，后者称为控制。还需指出， R_i 也是时间（t）的函数，因为开关$_i$ 可以随时间调制，这实际上正是重构的起源。

$\mathbb{M}_i(t,\ \vec{r},\ R_i)$ 表示为

$$\mathbb{M}_i(t,\vec{r},R_i) = A_i(R_i)F_i(\vec{r},R_i)e^{j(\Delta\omega_i(R_i)t+\Delta\varphi_i(R_i))}\mathbb{J}_i(R_i), \tag{5}$$

其中，幅度响应（A）描述能量放大、衰减或保持的状态；单元辐射方向图（F）是接收位置（$\vec{r}$）的函数，既可以塑造波束，也可以确定波束方向；附加频率（$\Delta\omega$）可以改变入射频率，这属于一种非线性效应；附加相位（$\Delta\varphi$）描述入射波遇到电磁单元时产生的移相效应；琼斯偏振矩阵（$\mathbb{J}$）是一个 2×2 矩阵，通常具有各向异性，可以调制入射偏振（$|p^{inc}\rangle$），相应地， $\mathbb{M}$ 也是一个 2×2 矩阵。这五个单元调制维度可以完全覆盖并调制电磁波的五个维度。

$\mathbb{P}_i(\vec{r})$ 描述了从可重构超表面到信息接收器的路径。假设该路径为线性、时不变、各向同性、均匀且单路径，则其数学模型为

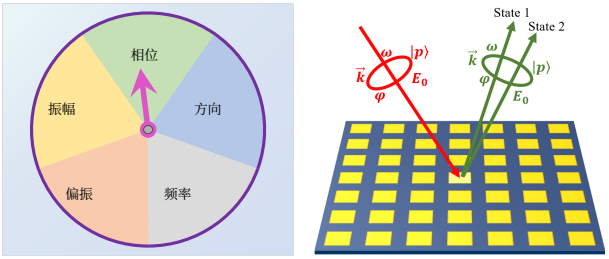
$$\mathbb{P}_i(\vec{r}) = L_i(\vec{r})e^{-j\vec{k}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_i)}\mathbb{I}, \tag{6}$$

其中， L_i 表示从第 i个单元到接收器的路径损耗， $\mathbb{I}$ 表示极化单位矩阵。显然，路径模型由信息接收器的位置（$\vec{r}$）和各单元的位置（$\vec{r}_i$）决定。

每个单元对入射波不同维度的响应可能不同，并且由于单元可以在多个维度上实现可重构，因此可以动态调制电磁波的这些维度。将各单元的响应相加后，即可根据式（2）得到可重构超表面散射的电磁波。

4. 信息分配策略

如式（2）所示，可重构超表面的特性由电磁单元决定。假设一个电磁单元需要生成N比特信息（2^N 种状态）。由于电磁信息存在于电磁波中，因此可以将N比特信息分配到电磁波的不同维度。相应地，单元需要对电磁波的这些维度进行独立调制，并且每个单元都必须能够响应所需的电磁波维度。同时，加载 N 个独立开关即可实现N位元件。传输多维电磁信息的关键在于相应地设计多维可重构单元。因此，这种策略称为信息比特分配，即将多维电磁信息比特分配给多维可重构电磁单元。这种策略有助于研究人员理解各类可重构单元的功能，并识别不同类别的可重构单元。



(a) (b)

图 2 1比特分配示意图。(a) 在任一时刻，1比特信息可分配给五个维度中的一个。因此，1位单元共有五种类型。(b) 1位可重构单元的功能，其中单元可操控一个入射波，使其呈现两种不同的散射状态。

严格来说，总电磁响应是不同维度的各个单元响应之和。由于 R-MTS 中有 M 个独立单元，且每个单元操控 N 个独立比特，因此整个 R-MTS 的总调制比特数为 $M \times N = K$，这可以大幅增加信息量。考虑阵列的影响，阵列级别上各单元的排列方式和状态也值得仔细设计，这称为阵列级比特分配。但鉴于阵列级比特分配的重要性和基础性，我们在本文中主要关注单元级。阵列级比特分配策略更加复杂且灵活，超出了本文的讨论范围。

在接下来的章节中，我们将应用信息分配策略，对不同维度的可重构单元进行综述。我们首先综述 1比特单元，这类单元只有一个可重构维度，通常由一个独立开关实现。随后综述 2比特单元，这类单元可能具有两个可重构的独立维度，并由两个独立开关实现。沿着这一思路，可以设计不同维度的更多比特可重构单元，以实现更多功能。

III. 1比特单元

本节回顾仅有一个独立开关的1位可重构单元。受限于1位，每个单元有两种状态。因此，1位单元只能操控电磁波的一个维度，或若干个相关维度，但总共仅承载1比特信息，即只有两种状态。

由于电磁波具有五个维度，因此信息比特分配有五种类型，分别对应仅相位、仅振幅、仅偏振、仅方向和仅频率调控单元（图 2）。研究人员为设计每种可重构元件付出了大量努力，并在过去几十年中取得了重大突破。以下各部分将分别回顾其一些典型成果。

分别在以下各部分中查看。

1. 仅相位单元

在五种1位可重构超表面中，研究最为广泛的是仅相位元素。对于仅相位元素，公式（2）可简化为以下形式

$$\vec{E}^{sca}(\vec{r},t)=\sum_{i=1}^{M}\vec{C}_i(\vec{r})e^{j(-\vec{k}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_i)+\Delta\varphi_i(R_i)+\varphi_i^{inc})}\cdot e^{j\omega t}, \tag{7}$$

其中系数项为时不变

$$\vec{C}_i(\vec{r})=L_i(\vec{r})A_iE_{0i}^{inc}F_i(\vec{r})\mathbb{J}_i|p_i^{inc}\rangle. \tag{8}$$

仅相位元素只改变第 i附加相位$\Delta\varphi_i$，其他维度通常不随开关配置和时间变化。公式（7）表明，可重构超表面的辐射方向图由每个单元的 $\Delta\varphi$ 决定，这意味着近场相位会影响远场波束图样。因此，仅相位可重构超表面可实现多种应用，例如动态波束成形、波束扫描 [10], 、可重构全息图 [11], 、可重构轨道角动量（OAM）波束生成[12],等。

1位相位是对连续相位的量化，只有两种相位状态。通常，研究人员会选择近场 180°两种配置之间的相位差，因为这样可以将相位量化损耗降至约 3 dB–3.9 dB [13, 14]。

人们设计了各种不同配置、开关、频段和功能的1比特单元。根据反射阵理论，单元的附加相位可通过延迟线、改变尺寸或改变旋转角度来调节 [1, 15, 16]。基于这些相位调节方法，单元上射频开关的开/关状态可用于模拟尺寸变化或角度旋转。因此，单元的附加相位可以改变。

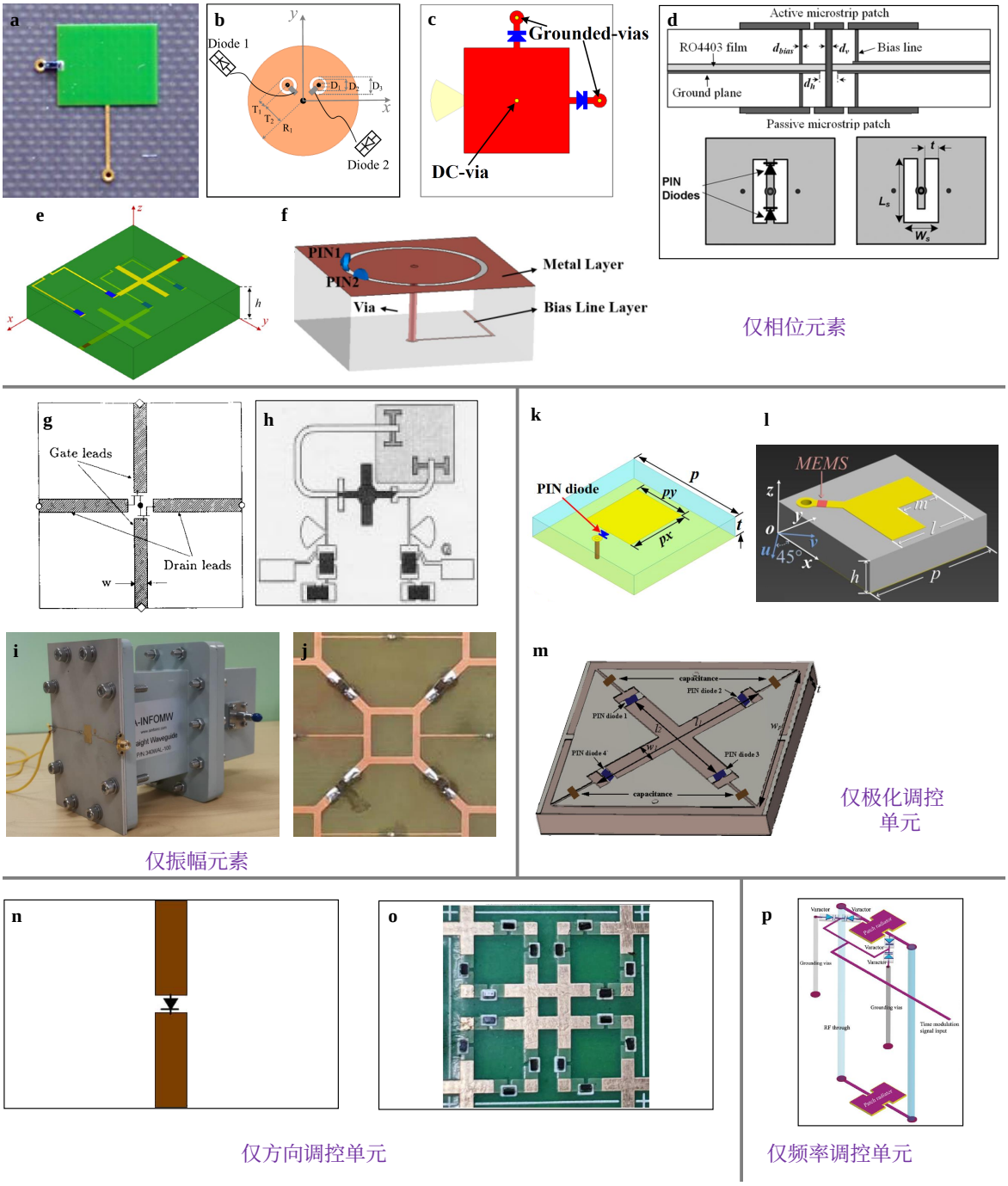


图3 操控五个维度之一的1比特可重构单元。(a)-(f) 仅相位元素。(a) 每个单元使用单个开关实现1比特相位重构 [17]。(b) 带有两个开关的1比特相位可重构反射单元，可实现极化转换 [23]。(c) 带有两个开关、由一个偏置信号控制的1比特单元，可响应双线极化和圆极化 [28]。(d) 基于收发结构的可重构透射阵列单元。两个PIN二极管交替开启/关闭，使得发射结构中的电流反向 180° [30]。(e) 双层可重构透射阵列单元，其中一层上设有一个开关，可同时调节相位 [39]。(f) 单层双向可重构单元 [40]。(g)-(j) 仅振幅元素。(g) 基于差分放大器的放大栅格阵列 [45]。(h) 基于FET晶体管的放大型反射阵 [46]。(i) 利用参数放大原理的放大单元 [47]。(j) 一个带有四个朝向不同方向的PIN二极管的可切换吸波器，能够响应全极化 [52]。(k)-(m) 仅极化调控单元。(k) 线极化-线极化切换单元 [10]。(l) 线极化-圆极化切换单元 [59]。(m) 圆极化-圆极化切换单元 [60]。(n)-(o) 仅方向调控单元。(n) 频率选择表面上的柱状有源偶极子单元 [61]。(o) 全极化互补井号形1比特可重构平面频率选择表面 [64]。(p) 基于时间调制的频率转换单元 [70]。

1) 基本纯相位单元
一个开关配合1位控制信号，即可实现单极化电磁波的纯相位重构。在微波频段，通常使用单个PIN二极管作为开关来调节相位 [7, 10, 17–22]。在 [10, 17, 18], 通过精心设计单元、开关和偏置线，实现了高效率的独立可寻址可重构反射阵列天线（RRA）（图3(a)）。此外，还推出了工作于不同频段的各种RRA。在毫米波频段，已采用商用PIN二极管制造出60吉赫RRA原型 [19]。宽带RRA始终是研究重点，近期一项研究报告的带宽高达38.4% [22]。在太赫兹和光学频段，调制原理相似。然而，可调器件尚不成熟，限制了这一研究领域的发展。近年来，人们还引入了许多可调材料，用于调节这些高频频段的相位。

使用一个具有两种状态的控制信号同步操控多个开关，也可视为一个1位单元。通过增加相关联的开关，可以在一个单元上集成更多功能。

2）与偏振维度相关的仅相位单元

通过加载多个相关联的开关，可以在全频段内实现稳定的 180° 相位调制和极化转换。若对单元和开关进行适当设计，则可推导出具有极化转换功能的琼斯矩阵

$$\mathbb{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

这意味着该琼斯矩阵可以交换入射偏振，换言之，反射极化旋转了 90°。通过施加控制信号交替调节开关的开/关状态，可以实现精确的 180°相位差。许多研究已将极化转换原理应用于RRA设计中 [23–27]。例如，文献 [23] 表明，由一条信号线控制两个PIN二极管交替切换，可基于极化转换原理实现稳定的 180° 反射相位差（图 3(b)），从而对具有1位相位差的圆偏振（CP）波进行调控。

双开关单元能够响应双线极化和双圆极化波。具有两个或更多开关的极化转换单元能够响应多极化。此外，文献 [28] 报道，在贴片正交侧边加载两个关联开关，可调节相位，并响应双线性极化和双圆偏振（图3(c)）。

3）与方向维度相关的仅相位单元。除了反射式超表面外，具备1位相位调谐能力的透射式超表面也得到了全面研究，这类超表面被称为可重构透射阵列天线（RTA）。研究已证明，至少需要两个开关才能实现高性能的1比特RTA单元 [29]。基于两个开关，采用电流反转方法实现1比特相位控制，是设计RTA的一种有效途径 [30–36]。例如，文献 [30] 提出了一种收发结构，通过两个PIN二极管改变单元构型，使电流相互反转 180°，进而使透射相位反转 180°（图 3(d)）。与所有开关都位于同一层的RTA不同，近年来，有研究提出了开关位于不同层的多层RTA [37–39]。例如，文献 [39], 设计了一种双层惠更斯单元，每层分别加载一个相关联的开关，以实现1比特相位控制（图 3(e)）。

单层R-MTS还可实现具备极化转换功能的双向波束扫描 [40],，其中一半能量被反射，另一半被透射（图 3(f)）。

2. 仅幅度单元
根据公式（5），单元的幅度调制可表示为 A。电磁波遇到超表面时，能量可以被放大（$A > 1$）、衰减（$A < 1$）或保持不变（$A \approx 1$），因此仅幅度单元应为有源、有损或近透明单元。幅度调制单元可用于信道调制 [41], 、中继放大 [42] 等。一些微波频段的1位幅度R-MTS原型已在 [42–52]中展示。

基于收发结构、以有源晶体管作为能量放大器的放大型透射阵于 20 世纪 90 年代被提出 [43–45]。如图 3(g) 所示，一对垂直栅极引线用于接收来自自由空间的能量，两个晶体管构成一个差分放大器，其源极相连 [45]。栅极能量经放大后，由一对漏极引线沿水平方向辐射。同时，通过调节晶体管电源的开/关状态，可在放大状态和维持状态之间切换。

文献 [46], 提出了一种基于 FET 晶体管的放大型反射阵，如图 3(h) 所示。贴片接收线极化波，并通过 H 形槽将能量耦合至微带线。随后，能量在电路中得到放大，并通过贴片以正交极化方式重新辐射至自由空间。

近期，文献 [42, 47] 研究了一种基于参量放大器的放大型反射阵。基于电路中变容二极管的非线性效应，2.36 GHz 入射信号在 4.72 GHz 泵浦提供能量的情况下得到放大并反射（图 3(i)）。通过改变泵浦能量可调节放大增益，从而实现振幅重构。

近年来，基于有源频率选择表面（AFSS）的可切换吸收-反射器或吸收-透射器已得到开发 [48–53]。在导通状态下，具有较大插入损耗的非理想 PIN二极管可在谐振频率处吸收能量；而在关断状态下，波则会被可重构超表面散射

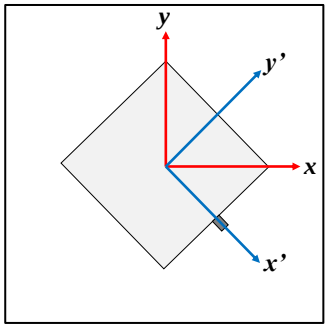


图 4 考虑偏振的坐标系定义示意图。

且不会衰减。切换开/关状态可以调制振幅。单元上安装多个 PIN二极管后，可响应多种极化，从线极化 [49, 50], 、双线极化 [51], 到全极化（图 3(j)）[52, 53]。

3. 仅偏振单元

偏振 $|p\rangle$ 是空间电磁波的固有维度之一。1位偏振可重构单元可在两种偏振状态之间切换，数学上，琼斯矩阵 $\mathbb{J}$ 在两种形式之间变化。极化比特也被用于传输信息 [54]。

这里先回顾1位偏振重构的原理。假设入射极化沿 x 轴。一个开关沿 x' 轴加载，其中 x'-y' 坐标系相对于 x-y 坐标系旋转了 45° ，如图4所示。假设沿 x' 轴和 y' 轴的散射响应彼此隔离。若沿y' 轴的附加相位为 $\varphi_{y'}$ ，沿 x' 轴的相位为 $\varphi_{x'}$，则在 x'-y'坐标系下，单元调制矩阵可简写为

$$\mathbb{M}' = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_{x'}} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_{y'}} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

且入射波为

$$|p'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{11}$$

因此，散射波为

$$\vec{E}' = \mathbb{M}'|p'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{j\varphi_{x'}} \\ e^{j\varphi_{y'}} \end{pmatrix}. \tag{12}$$

在 x-y 坐标系下，散射波为

$$\vec{E} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{j\varphi_{x'}} + e^{j\varphi_{y'}} \\ e^{j\varphi_{x'}} - e^{j\varphi_{y'}} \end{pmatrix}. \tag{13}$$

由于沿 y' 的相位固定，设 $\varphi_{y'}$ 固定为180°；沿 x' 的相位可重构。下面考虑三种特殊情况。(1)$\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 180°$, $\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = 0°$。根据(13)，散射波在 LP（$x$）和 LP（$y$）之间切换。(2) $\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 90°$, $\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = 0°$。 $\vec{E}^{\mathrm{ON}}$ 为圆偏振， $\vec{E}^{\mathrm{OFF}}$ 为线偏振。因此，实现了 LP 波与 CP 波之间的偏振调制。(3)$\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 90°$, $\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = -90°$。散射波为两种自旋方向的 CP 波。因此，也可以产生并切换双圆极化转换。上述讨论总结于表 1。

表 1 1位偏振操控类型汇总。

$\varphi_{y'} = 180°$	入射偏振	散射偏振
$\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 180°$	线极化(x)	线极化(x) - 线极化(y)
$\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = 0°$	CP	右旋圆极化 - 左旋圆极化
$\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 90°$	线极化(x)	线偏振-圆偏振
$\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = 0°$	CP	
$\varphi_{x'}^{\mathrm{ON}} = 90°$	线极化(x)	右旋圆极化 - 左旋圆极化
$\varphi_{x'}^{\mathrm{OFF}} = -90°$	CP	线极化(x) - 线极化(y)

一些原型验证了文献 [10, 55–60]中线极化(x)-线极化(y)、线偏振-圆偏振以及左旋圆极化-右旋圆极化之间的切换。文献 [10, 57,58]研究了基于透射阵列的线极化-线极化切换。通过调节PIN二极管的开/关状态，反射线偏振会发生转换或保持不变（图3(k)）。文献 [59]研究了在线极化入射下的线极化-圆极化切换类型（图3(l)）。开关处于开通状态时，沿 x' 轴和 y' 轴的反射相位差为 180°，因此反射极化发生转换。开关处于关断状态时，相位差为 90°，因此会产生并反射圆极化。仅极化重构超表面也可以动态地将线偏振入射波转换为右旋圆极化/左旋圆极化 [60], ，其条件是通过开关状态调制 x' 轴与 y' 轴之间的相位差，使其为 90° 或-90° （图3(m)）。值得注意的是，如表1所总结的，其他极化状态也可以切换。

4. 仅方向单元

在公式（5）中， F 表示单元辐射方向图，它决定了单个单元散射出的主波束方向。值得一提的是，单元辐射方向图并不完全等同于阵列辐射方向图。后者不仅考虑单元辐射方向图，还会受到单元其他维度（如相位和振幅）的影响，正如公式（7）和（8）所推导的那样。

近年来，研究人员对反射-透射方向图可重构 AFSS 进行了全面研究 [58, 61–64]。文献 [61], 报道了一种中心带有可调 PIN二极管的偶极子频率选择表面，它可以切换电磁波的反射/透射状态（图3(n)）。如果 PIN二极管处于导通状态，偶极子会发生谐振，因此电磁波被频率选择表面阻挡并反射。反之，如果 PIN二极管处于关断状态，偶极子不会被激励，因此电磁波可以透过频率选择表面。随后，文献 [64], 报道了具有互补反射和透射响应、支持全极化的单元，如图3(o)所示。#形 AFSS 单元能够响应全极化。

[→]请注意， k 是全空间中的一个向量，这意味着其范围超出了

向前或向后传播。根据图案重构沿不同角度传播也属于仅方向类型。尽管反射型或透射型方向可重构单元已得到充分研究，但据我们所知，已发表的文献中尚未报道专用于单侧图案重构（角度重构）的仅方向调控单元，预计未来会有更多相关研究。

5. 仅频率可重构单元

新频率产生的内在工作机制是非线性效应。因此，如果可重构超表面的功能是转换频率，电磁单元就应具有非线性。自 20 世纪 80 年代以来，研究人员一直在研究仅频率可重构超表面 [65]。然而，由于单元结构复杂且应用有限，过去几十年间，研究人员对此关注甚少。近年来，现场可编程门阵列（FPGA）等数字控制电路的快速发展，使得利用时间维度基于可重构超表面产生新频率成为可能 [66–70]。图 3(p) 展示了一个频率转换单元，它可以混合空间电磁波和导波的频率，并将混合后的波重新辐射到自由空间中 [70]。

如式（4）所示，符号 R 使单元能够随时间 t 重构。假设将周期为 T 的控制信号施加于仅相位单元。则单元的附加相位可以进行周期性调制。根据公式（5），并考虑到唯一的变量是相位（$\Delta\varphi$），单元调制函数的主项为

$$M(t) = e^{j\Delta\varphi(t)}. \tag{14}$$

$M(t)$ 也是时间 t 的周期函数，因此应用傅里叶展开，$M(t)$ 可表示为

$$M(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} a_h e^{j\frac{2\pi h}{T}t}, \tag{15}$$

其中，$\{a_h\}$ 为傅里叶级数，并且

$$a_h = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{j\Delta\varphi(t)} e^{-j\frac{2\pi h}{T}t} dt. \tag{16}$$

只要 $\Delta\varphi(t)$ 不是常数，就会产生谐波频率分量。根据公式 (2)，当入射频率为 f_c 时，散射波的核心项为

$$E(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} a_h e^{j(2\pi f_c + \frac{2\pi h}{T})t}. \tag{17}$$

如式（17）所示，入射频率中加入了新的频率；如果控制信号可重构或开关周期可变，空间波的谐波频率分量也可重构。

本质上，电磁单元充当混频器，将自由空间中的频率与板载现场可编程门阵列的开关频率混合。快速切换的单元能够充当混频器，原因在于集总开关是一种非线性元件。开关的开/关状态经时间调制后会产生相位方波，这是产生新频率的内在来源。需要指出的是，频移的最大值取决于开关和现场可编程门阵列的切换速度；与空间电磁波的频率（$1/T \ll f_c$）相比，目前该速度仍然较低。因此，利用单元的快速状态切换实现的频移效果仍有待提升。

IV. 2比特单元

本节回顾了采用两个独立开关的 2比特单元的发展进展。随着单个单元操控的信息比特增多，可重构超表面趋于多维，并能实现多种功能。

请注意，(4) 中的响应符号 R 由两部分决定：控制和激励。根据信息分配策略，2 个比特有两种分配方式：两个比特都分配给控制，或者一个比特分配给控制，另一个比特分配给激励。

第一种类型中，每个单元一次可以主动操控2位信息，称为2比特操控型。由于电磁波有五个维度，2位分别分配到这五个维度，如图5(a)所示。将2位分配到两个不同维度有 C_5^2 种方式，而将全部2位分配到一个维度有5种方式。因此，2比特操控型单元的比特分配方式总共有 $C_5^2 + 5 = 15$ 种。

第二种类型中，单元可以设计为在一个维度上主动控制1位信息，同时利用另1位，独立响应一个维度上两个入射波的激励。通过复用一个单元，可以独立操控两个入射波，因此我们称这类单元为复用操控型单元。理论上，这种类型共有 $5 \times 5 = 25$ 种组合，如图5(b)所示。

这里分别回顾了一些已有的组合，其他组合仍有待进一步研究。

1. 一维中的2比特操控型单元

1) 2比特相位可重构单元

将2个比特都分配给相位维度的2比特相位单元是一种研究得较为充分的类型 [71–76]。2比特相位单元有四种可用相位状态：0°、 90°、 180° 和 270°。与1位相位相比，这种单元可以提高相位分辨率，并将RRA的量化损耗降低2.4 dB–3 dB[13, 14]。

2位相位调制至少需要两个开关。反射式和透射式2位相位可重构超表面均已实现。本文提出了一种基于非对称五边形单元的反射式结构，

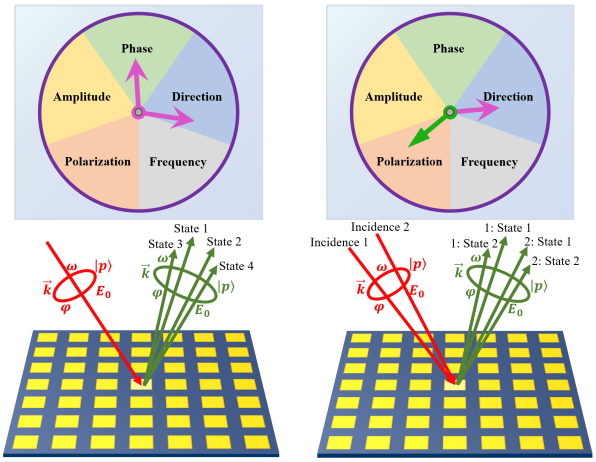


图 5 两种2比特分配方式的示意图。(a) 2比特操控型，可在一个入射波下主动操控一个或两个维度。两个比特分配给五个维度，因此此类比特分配共有 $C_5^2+5=15$ 种组合。(b) 复用操控型，可操控一个维度（粉色箭头），同时响应两个仅在一个维度上存在差异的入射波（绿色箭头）。理论上，此类比特分配共有$5\times5=25$ 种方式。

采用谐振方法，如 [71],中图6(a)所示，可产生 0°、 90°、 180° 和 270° 种反射相位状态。对于2位相位透射阵列，基于收发结构的透射阵列需要更多开关[73]。在接收贴片中实现 0°/180° 相移，在发射结构中实现0°/90° 相移，进而产生四种相位状态（图6(b)）。

2）2比特幅度可重构单元
如图6(c)所示，通过控制基于接收-发射结构的透射阵列 [77],两侧各一个放大器的电源电压，实现了具备幅度放大、保持和衰减功能的2比特幅度可重构超表面。事实上，通过连续调节电源电压，也可以实现连续幅度重构。

3) 2比特极化可重构单元
近期文献也报道了2比特极化可重构单元。使用两个独立开关有源地产生并调制三种极化状态[78]。PIN二极管分别沿 x， y 轴焊接（图6(d)），两轴上均具有 90° 开/关相位差。因此，分别独立调节两个开关，即可获得 90°、90° 和 0° 轴之间的相位差。如果入射线极化沿 x' 轴，则分别得到右旋圆极化、左旋圆极化和线极化反射波。值得一提的是，四种状态中的剩余一种状态是线极化的 90° 相位，本设计未使用该状态。

此外，为实现右旋圆极化、左旋圆极化、线极化（x'）和线极化（y'）四种状态的偏振可重构，我们提出了两种方法。如果入射极化沿 x' 方向，且沿 x 轴的附加相位为 0°/180° 、沿 y 轴的附加相位为0°/90° ，则可实现这种可重构。此外，还有另一种方法：如果沿 y 轴的反射相位固定为 180° 等值，那么当入射极化沿 x' 轴时，沿 x 轴相位可调的2位相位可重构单元也可用作2位偏振可重构单元。

4) 2比特频率可重构单元
频率可重构元件通常通过 y
时间调制实现，这将在第4.3节中讨论。

2. 两个不同维度中的2比特操控型单元

1) 相位-幅度可重构单元
如果将1位分配给相位，另一位分配给振幅，则称为相位-幅度可重构单元。文献 [79]报道了一种双层结构，其顶层由石墨烯构成，用于调控反射幅度；底层由PIN二极管构成，用于调节反射相位。在 [80],中，提出了集成两种PIN二极管的单层单元（图6(e)）。其中，一种PIN二极管在导通状态下具有较小的插入损耗，在关断状态下具有较高的隔离度，因此可用于调节反射相位，同时保持反射幅度不变。另一种PIN二极管在导通状态下同样具有较小的插入损耗，但在关断状态下能够吸收大部分能量，而对相位影响很小。因此，通过这些精心设计，实现了2位相位-幅度可重构单元。

文献 [81],提出了一种在调制反射相位的同时实现能量放大的反射阵列，如图6(f)所示。贴片和I形槽将 y极化的空间波转换为导波。传输线上加载了变容二极管，可用于调制透射相位。集总放大器用于放大传输线上的能量。随后，x极化的能量通过槽和贴片重新辐射出去。

2）相位-极化可重构单元
相位-极化可重构单元早在多年前就已设计并制造出来。2010年，文献 [82]提出了在反射阵列中实现相位调制同时控制极化的构想。通过采用入射极化沿 x' 轴的双极化可重构单元即可实现（我们将其归类为第4.4.2节中的极化复用相位调控 类型）。双极化可重构单元在 x-y 坐标系中的无损调制矩阵为
-

$$\mathbb{M}=\begin{bmatrix}e^{j\varphi_x} & 0\\ 0 & e^{j\varphi_y}\end{bmatrix}. \tag{18}$$

按照（11）–（13）中的类似推导， x'-y' 坐标系中的反射波为

$$\vec{E}'=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}e^{j\varphi_x}+e^{j\varphi_y}\\ e^{j\varphi_x}-e^{j\varphi_y}\end{pmatrix}, \tag{19}$$

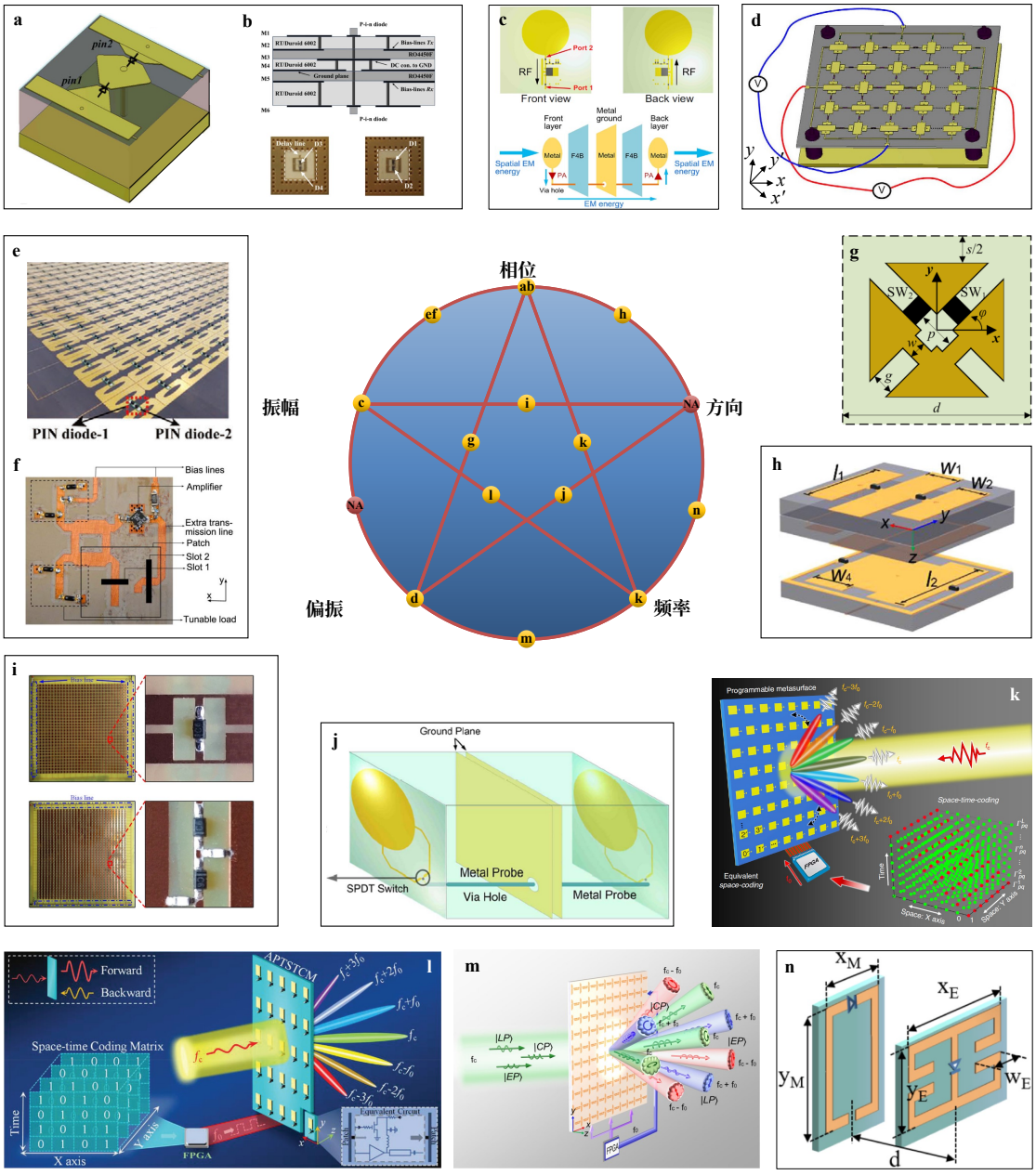


图 6 可重构元件利用2位主动操控五个维度中的一个或两个维度。(a) 基于四种可切换谐振状态的2位相位可重构反射阵列 [71]。(b) 基于收发结构的2位相位可重构透射阵列，其每一侧均配有两组开关 [73]。(c) 一种可实现幅度放大、保持和衰减功能的2位幅度可重构单元 [77]。(d) 一种2位极化可重构超表面，可在右旋圆极化、左旋圆极化和线极化状态之间切换 [78]。(e) 一种相位-幅度可重构超表面，其中一个PIN二极管调制相位，另一个控制幅度是否衰减 [80]。(f) 一种相位-幅度可重构反射单元，其中变容二极管调谐相位，晶体管控制幅度 [81]。(g) 一种相位-极化可重构单元，两个独立开关同步工作 [83]。(h) 一种相位-方向可重构单元，两个PIN二极管调制相位，另外两个PIN二极管操控方向 [87]。(i) 一种方向-幅度可重构原型 [89]。(j) 使用两个单刀双掷开关的方向-极化可重构单元 [91]。偏振和方向均可灵活控制。(k) 频率-相位重构示意图 [92]。谐波频率波的波束方向可分别控制，且谐波频率可调谐。(l) 频率-幅度可重构超材料表面，其基于时空调制，可在谐波频率下调谐放大水平 [97]。(m) 基于时间调制策略的频率-极化重构，可在谐波频率下生成任意偏振 [99]。(n) 一种基于动态时空调制的频率-方向可重构惠更斯单元，其中前向和后向能量之比可调 [100]。

沿 x 轴和 y 轴分别实现1位可重构相位。假设相位在关断/导通状态下分别在 0°/180° 之间切换，可得到以下四种反射波状态

$$\vec{E}'_{\mathrm{ON-ON}} = \begin{pmatrix} e^{j180^\circ} \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{E}'_{\mathrm{OFF-OFF}} = \begin{pmatrix} e^{j0^\circ} \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \vec{E}'_{\mathrm{OFF-ON}} = \begin{pmatrix} 0 \\ e^{j0^\circ} \end{pmatrix}, \vec{E}'_{\mathrm{ON-OFF}} = \begin{pmatrix} 0 \\ e^{j180^\circ} \end{pmatrix}. \tag{20}$$

如图所示，偏振在 x' 轴和 y' 轴之间动态切换，同时独立调制反射相位。

进一步设计并仿真了一种简化的反射单元，实现2位相位-极化重构，如图6(g)中的 [83], 所示。近年来，基于收发结构的RTA也展现出对线极化（x）-线极化（y）转换进行2位相位-极化调制的能力 [84]。此外，若将沿 x' 轴和y' 轴的相位差设计为 90°/-90°，则可产生并调制右旋圆极化/左旋圆极化，如 [85]所示。

3）相位-方向可重构单元
相位-方向可重构类型是近期出现的 [86–88]。例如，如图6(h)所示，该单元由两层组成，顶层控制相位，底层控制方向。每个单元均可独立控制，其中1比特用于相位重构，1比特用于方向重构。

4）方向-振幅可重构单元
方向-振幅调控类型是2比特单元的另一种组合，适用于反射、透射或吸收切换等应用 [89, 90]。文献 [89],中，基板的两层均焊接有PIN二极管（图6(i)）。顶层的PIN二极管可决定电磁波是穿过第一层还是被吸收。底层的PIN二极管可控制反射或透射状态。请注意，2比特单元只有三种状态，因为如果电磁能量在顶层被吸收，考虑电磁波的传播方向就毫无意义。

5) 方向-极化可重构单元
近期文献中也报道了方向-极化可重构单元。文献 [91] 提出了一种由入射极化控制的反射-透射型R-MTS。在顶层和底层设计了两个相同的结构，每层各设有一个单刀双掷（SPDT）开关（图 6(j)）。顶层SPDT开关可控制哪种极化状态能够透射到底层，而底层SPDT开关则可决定激发哪种极化状态的透射波。因此，若入射极化沿 x 轴，则可获得三种状态：x 极化反射波、 x 极化透射波和 y 极化透射波，且偏振和方向可独立调控。

3. 与频率重构相关的2比特操控型单元

第 3.5 节已讨论频率重构。此处，利用控制信号的特性，既可以调制电磁波的频率，也可以调制其其他维度。根据式（16）， a_h 是一个复数，表示由控制信号波形决定的第 h 次谐波频率的幅度和相位响应。每个 a_h 都可以拥有很大的设计自由度。因此，通过施加不同的可切换信号波形，可以独立调制谐波频率下的各种波维度。

1) 2比特频率与频率-相位可重构单元
文献 [92–96] 表明，通过精心设计单元的相位波形，可以利用1位或2位相位可重构单元对不同谐波频率的相位进行独立调制。因此，可以同时生成不同频率的扫描波束（图6(k)）。此外，信号周期 T 可以调制谐波频率，因此频率也可以重构。

2) 频率-幅度可重构单元
除了频率-相位重构，近期也有关于频率-幅度重构类型的报道 [97]。如图6(l)所示，在无源结构上加载了一个放大器和一个场效应晶体管，通过动态控制场效应晶体管，可重构超表面能够在不同谐波频率下产生可调的放大电磁波。

3）频率-极化可重构单元
近年来，基于时间调制策略的任意偏振重构也取得了进展 [98, 99]。例如，利用两组PIN二极管对正交偶极子进行动态调制，以改变谐波频率下正交线极化波的透射振幅和相位（图6(m)），从而通过合成两种经调制的线极化波生成任意透射偏振。

4）频率-方向可重构单元
文献 [100], 中出现了频率-方向重构类型，如图6(n)所示。设计了一种时变惠更斯超表面，用于改变谐波频率下反射与透射之间的能量比。通过采用空时调制策略，还可以调控波束扫描角。

5）讨论
根据信息分配策略，单个可重构单元配备至少 N 比特的物理器件，即可调制 N比特信息。在这里，通过快速切换单元状态，时间域调制可提供一些额外的可调比特。因此，这种可重构超表面也称为时间调制超表面。此外，将单元扩展为周期阵列时，不同单元位置的状态各异，

信息量也会通过空间域调制实现复用。这种类型称为空间调制型可重构超表面，即前文讨论的阵列级重构。此外，通过结合空间调制和时间调制，时空调制型可重构超表面能够利用空间和时间域中的额外维度，从而实现新颖的功能，是一个很有前景的未来研究方向。

4. 复用操控型单元

除了对两个维度进行有源操控外，有源操控一个维度，同时独立响应两种不同的入射波，也是 2 比特单元的一大类别。理论上，复用操控型共有 25 种组合，但其中有些并不实用。在此，我们回顾已有的组合，并对尚未实现的组合提出一些设想。

1）频率复用相位操控单元 频率复用相位控制是利用单个可重构超表面实现全双工通信的一个自然思路。为在相同偏振下响应两个频段并独立调制相位，可以设计一个由两个分别工作于这两个频段的独立单元组成的超胞 [101, 102], , 示例如图 7(a) 所示。

2）极化复用相位操控单元 极化复用相位操控是一种研究充分的类型 [103–107]。基于两个正交方向之间隔离度的单元能够独立操控两种极化。因此，单个单元可以同时作用于由正交极化区分的两种入射波。如图 7(b) 所示，具有两组独立微机电系统的十字形单元可以调制双线极化波的反射相位 [103]。

此外，文献 [107]展示了双线极化复用透射阵列。将两个1比特相位可重构偶极子正交放置，构成一个单元，从而实现发射偏振复用（图7(c)）。

上述文献均基于线极化入射。我们注意到，文献 [108–111]已对用于独立双圆极化复用的固定超表面进行了充分研究。然而，据我们所知，文献中尚未报道针对双圆极化入射波的独立相位重构，这或许是未来的研究课题。

3）偏振复用方向操控单元

如第 3.4 节所示，偏振复用的方向操控由 1 位方向重构发展而来。文献 [112, 113] 在两层上加载正交开关，以分别操控两种入射极化的传播方向，如图 7(d) 所示的示例。此外，在这些层的顶部增加极化转换层，以实现极化转换功能 [114]。同时，在顶部和底部增加固定相位层，并从不同的入射极化中获得不同的全息图像及可控的方向 [115]。

4）方向复用方向操控单元 文献 [116]提出了一种2位可重构超表面，可在响应两个方向入射波的同时调制波的传播方向。该超表面利用放大器固有的非互易性，实现对两侧传播方向的独立调制。由两个方向相反的放大元件组成的超胞可分别响应正向波和反向波（图7(e)）。若正向单元处于导通状态，正向电磁能量便会被放大并透射；否则，正向能量将被阻断并向后反射。反向单元也能以类似方式调制反向入射的电磁波。因此，来自两个方向的入射波可以被独立调制。

5）尚待探索的复用操控类型

如上所述，如今多功能可重构超表面的复用操控类型正不断涌现。接下来的几段将探讨其他一些复用操控类型的可重构单元设计思路。

方向复用相位调制也是一个颇具前景的研究主题。这里我们讨论两种方向复用类型。第一种称为*Janus*超表面，参见 [117, 118]。Janus超表面分别响应双向入射波，从超表面的两侧可获得两幅互不相关的透射全息图像[118]。

此外，方向一词不仅指相反的方向，也指入射角。基于此，另一种类型是角度复用相位调制，即超表面在不同入射角下生成独立设计的波束图样。 [119–123], 设计了角度敏感元件，使其能够独立响应不同的入射角。

方向复用超表面如今已成为一个新的研究趋势，而上述所有工作都聚焦于固定超表面。可重构方向复用相位调谐在未来可能具有巨大的潜力。

极化复用重构也是一个颇具吸引力的课题。除了上文综述的相位重构和方向重构之外，极化复用的幅度重构或频率重构仍是尚未探索的课题。未来可以开展相关研究。

V. 新兴课题与未来趋势

1. N位元件

本文主要综述了1位和2位可重构元件。此外，支持超过2位重构的元件也是研究热点之一 [124, 125]。从1位和2位比特分配演变而来，N-

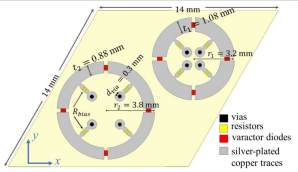
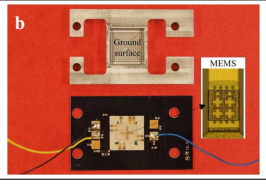
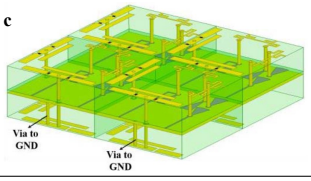
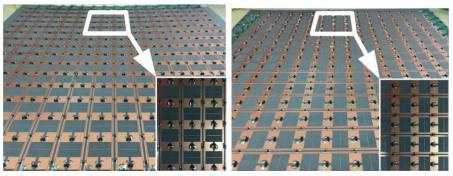
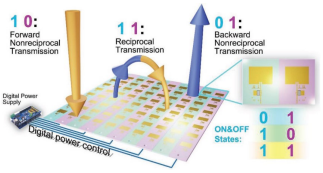
复用 维度	调控 维度	样本
频率	相位	a 
偏振	相位	b  c 
偏振	方向	d 
方向	方向	e 

图7 具有一个复用维度和一个调控维度的2位可重构单元。(a) 频率复用相位操控单元，在一个超胞中包含两个可重构单元，工作于两个频段 [102]。(b) 极化复用相位操控反射单元 [103]。(c) 极化复用相位调控透射阵列 [107]。(d) 极化复用方向调控原型 [113]。(e) 方向复用方向可重构设计 [116]。该超胞可决定来自两侧的电磁波能否穿过超表面。

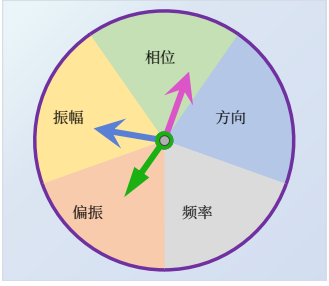


图8 N比特分配示意图。 N 比特可通过多种复用比特与调控比特组合，独立分配给五个维度。更高分辨率的单个单元能够关联更多维度，因此，与1位或2位可重构超表面相比，可重构超表面的功能可大大丰富。

比特分配如图8所示。

将 N 比特分配给一个维度可以提高该维度的分辨率，从而提升性能。此外，能够调制电磁波五个维度的全维度单元可以扩展可重构超表面的功能，这也是一个很有前景的研究方向。我们已经了解到，2位相位可重构的量化损耗为 0.6 dB - 0.9 dB [13，14]，这一损耗在大多数应用中是可以接受的。其他维度的情况也类似。因此，将 N 比特分配给不同维度通常比仅提高一个维度的分辨率更有价值。此外，在多维度中复用单个单元，同时操控多维电磁波，需要采用 N 比特复用操控型可重构超表面。然而，具有超过 2 位可重构维度的单元仍未得到充分研究。

要实现N比特单元，在单个单元上集成更多集总开关是一种自然的方案。然而，由于开关体积庞大且偏置线复杂，单个单元上的开关数量受到限制。采用变容二极管等连续可调开关也能实现多比特重构。然而，这种方案需要精确的电压控制，不够稳健，而且会增加控制电路的复杂度。如第4.3节所述，时变调制超表面具有实现N比特调制和多维单

元件的潜力。尽管如此，辐射效率有限、控制电压复杂、带宽窄以及调制速度低，仍是这一方案的瓶颈。因此，多维N比特单元仍是有待未来研究攻克的难题。

2. 太赫兹与光学可重构超表面

由于微波频段已有PIN二极管和变容二极管等高性能集总开关可用，且印刷电路板（PCB）技术等主流制造工艺已成熟且成本低廉，微波频段的可重构超表面近几十年来取得了重大突破。太赫兹和光学可重构超表面的需求也在迅速增长。然而，在太赫兹和光学频段，商用集总开关尺寸过大，无法焊接，且开关的开/关比有所降低。科学家正在寻求频率更高、性能更优的新型开关和架构。近年来，微纳制造技术发生了巨大变革，太赫兹和光学频段的可重构超表面如今正快速发展。

在太赫兹频段，已有多种开关被引入，例如肖特基二极管 [126，127] （图9(a)）、高电子迁移率晶体管（HEMT） [128–132] （图9(b)-(c)）、石墨烯 [133，134]，互补金属氧化物半导体（CMOS） [125，135，136] （图9(d)）、二氧化钒（VO_2） [137–139]，等。例如，HEMT开关具有较高的开/关比和较低的控制复杂度，有望在太赫兹频段实现1比特相位控制 [128，129]。此外，文献 [130，131],报道了基于HEMT开关的空间太赫兹幅度调制器，其幅度调制深度为93%，调制速率为1 GHz。

在光频段，同样没有可用的集总开关，因此单元同时充当纳米天线和开关 [140]。这些开关由氧化铟锡（ITO） [141] （图 9(e)）、石墨烯 [142]，、硫属化合物锗锑碲（GST）[143–148] （图 9(f)）、液晶 [149]，、聚合物聚（3,4-乙烯二氧噻吩）：聚苯乙烯磺酸（PEDOT:PSS） [150] 等制成。例如，GST 等相变材料可在光频段提供明显的开关性能。飞秒脉冲诱导 GST 发生非晶态-晶态转变 [143]，，从而改变单元的谐振状态，进而调制方向、相位或振幅。

然而，太赫兹和光学可重构超材料表面仍有许多挑战亟待解决，例如提高效率、提升开关速度、消除栅瓣以及实现独立寻址。此外，太赫兹和光学频段中的多维多功能可重构超表面也是未来的发展趋势。

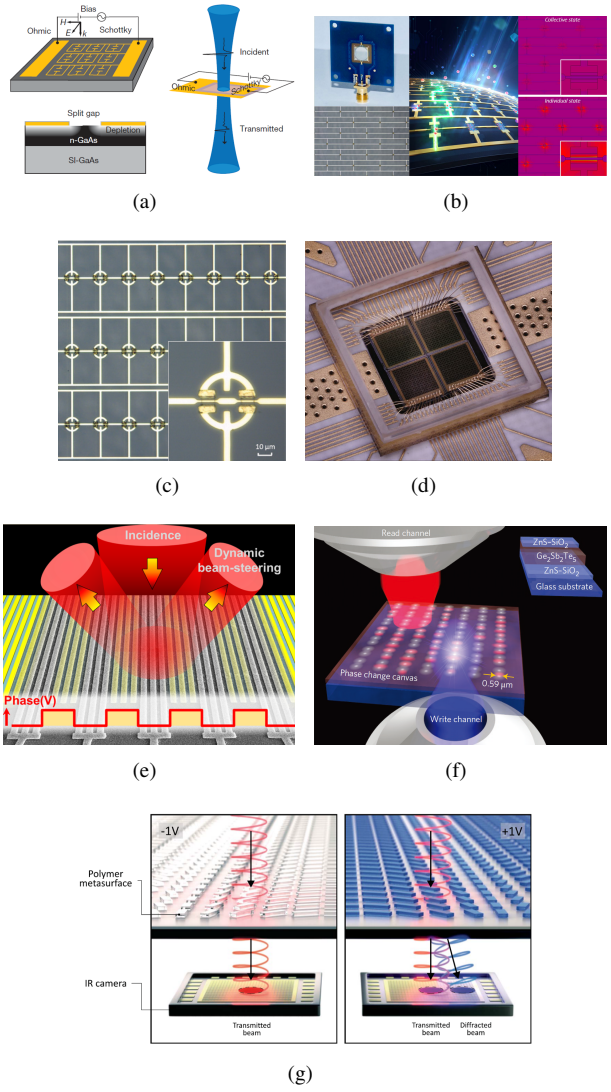


图 9 (a)–(d) 太赫兹超表面和 (e)–(g) 光学可重构超材料表面。(a) 基于肖特基二极管的太赫兹幅度可重构阵列 [126]。(b) 基于 HEMT 的太赫兹幅度可重构透射阵列 [131]。(c) 基于 HEMT 的太赫兹相位可重构原型 [129]。(d) 基于 CMOS 的太赫兹相位可重构原型 [125]。(e) 基于 ITO 的光学相位可重构原型 [141]。(f) 基于 GST 的光学幅度可重构设计 [143]。(g) 基于 PEDOT:PSS 的光学相位可重构设计 [150]。

3. 表面波可重构超材料表面

上述大多数超表面都用于调控空间波，即电磁波在自由空间中传播。此外，超表面还能够调控表面波，即电磁波沿超表面的切向传播。

自 20 世纪 90 年代以来，人们提出了利用二维光子晶体操控光频段的表面光 [151–154]，，这一课题至今仍备受关注。为更灵活地引导表面波，人们人工制造了光子拓扑绝缘体[155–157] ，它们能够控制光的

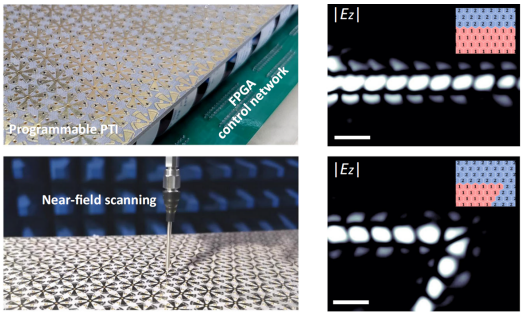


图10 微波频段中的可重编程拓扑绝缘体 [165]。通过独立寻址单元的配置，可以对表面上的传播方向进行编程。

表面传播方向。

周期结构也可以操控微波频段中的表面波。高阻抗表面（HIS）形成电磁带隙（EBG） [158–161]，以禁止沿超表面传播的波。

诱导表面波与空间波之间转换的超表面也得到了研究。相位梯度超表面可以将空间电磁波转换为表面波 [162]。此外，人工阻抗表面（AIS）可以将表面波转换为定向空间波束 [163]。

尽管表面波操控取得了重大突破，但用于表面波调制的可重构超表面相较于固定式表面波超表面，研究仍较少。已有少量可重构超表面被提出，用于动态操控表面波。文献 [164] 早期提出了基于变容二极管的可调谐电磁带隙结构。近期，有研究提出了一种工作于微波频段的可重编程拓扑绝缘体 [165]。如图10所示，通过PIN二极管的两种状态调节单元配置，并通过切换单元状态动态调制表面波的传播方向。

可重构超表面对表面波的高度操控灵活性表明，它是未来值得深入研究的方向。

4. 非线性可重构超表面

过去几十年来，线性超表面得到了广泛研究。为实现更多功能，设计超表面时需要考虑非线性效应。严格来说，重构是一种非线性，发生在状态变化的瞬间。然而，在每个稳定工作状态下，对入射电磁波的响应仍是线性的。因此，可重构超表面本质上是准线性的。

对于真正的非线性超表面，其响应始终是非线性的。一般而言，能量放大、新频率产生以及某些无磁非互易效应，都是非线性效应的具体形式。基于这些非线性效应，多年来已有一些非线性超表面被设计出来。

能量放大基于材料的非线性特性。基于晶体管的超表面放大器早期已实现

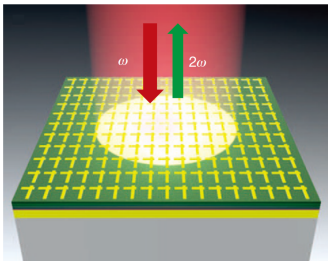


图11 用于二次谐波产生的光学非线性超表面 [170] .

于 [43–46, 81], ，而基于变容二极管的参数放大超表面单元则是近期才实现的 [47]。

自20世纪80年代以来，人们一直在研究频率产生超表面 [47, 65]。研究人员在准光学栅格阵列中引入集总非线性元件，以实现微波频段的空间波处理功能，例如振荡器[166, 167], 、倍频器 [168] 和混频器[169]。在光频段，研究人员采用非线性材料构成非线性超表面 [170–173], ，以实现二次谐波产生（SHG）或三次谐波产生（THG），如图11所示。近年来，随着时变调制超表面的发展，利用时间维度进行频率重构已成为新的研究趋势[67–70, 92–100]。

无磁非互易超表面如今正逐渐兴起。为实现无磁效应的非互易性，人们将非线性效应纳入考量。基于放大器的非互易性，非互易超表面能够放大前向波并阻断反向波 [116, 174,175]。此外，时间调制的可重构超表面还可以在不具互易性的情况下调制频率和波束方向 [176–178]。

除这些应用外，非线性超表面还可实现其他功能，例如全光逻辑门 [179],空间波限幅器 [180],波形相关吸收器[181] 等，这些都是未来研究中值得关注的课题。此外，可重构非线性超表面能够利用具有动态功能的非线性效应，这或将引领未来更广泛的研究热潮。

VI. 结论

作为超表面的高级形式，可重构超表面被提出用于动态操控散射波。近年来，具有不同操控维度和功能的众多可重构超表面不断涌现。在本文综述中，我们首先从五个维度出发，讨论可重构超表面、电磁波与电磁信息之间的相互作用，并针对入射电磁波的五个维度提出可重构超表面的数学模型。随后，我们提出一种称为信息分配策略的框架，用于系统地对不同类型的可重构超表面进行分类。基于该策略，首先对操控五个维度之一的1比特可重构单元进行综述和分类。下一节将综述并分类多维、多功能的2比特单元。

各种2比特单元被分为两大类：2位操控类型（15种）和复用操控类型（25种），并分别对现有单元进行详细综述。

由于可重构超表面的发展速度迅猛，相关术语层出不穷，使得整个研究体系变得混乱。希望按照信息分配策略对可重构超表面进行重新梳理和整合，能够为研究人员厘清发展脉络、把握未来研究趋势提供有益视角。本文发现，某些类型的多比特可重构单元尚未实现，例如一些操控2位的单元以及许多复用操控单元，可重构超表面的功能也尚未得到充分发挥。此外，我们还探讨了可重构超表面可能的演进方向，例如多比特可重构超表面、太赫兹/光学可重构超表面、表面波可重构超材料表面、非线性可重构超表面等。

作为科学和工程领域近期的研究热点，对可重构超表面的探索才刚刚展开。可重构超表面在通信、探测、传感、成像和计算等领域的关键应用中展现出巨大机遇。相信可重构超表面将在不久的将来带来一场技术革命。

致谢

本研究部分受中国国家自然科学基金（项目编号：U2141233）资助，部分受中兴通讯产学研合作基金资助，另部分受科学探索奖资助。

参考文献

[1] P. Nayeri、F. Yang 和 A. Z. Elsherbeni，反射阵天线：理论、设计与应用，约翰·威立父子出版公司，2018。[2] N. I. Landy、S. Sajuyigbe、J. J. Mock、D. R. Smith 和 W. J. Padilla，“完美超材料吸收器”，《物理评论快报》，第100卷，第20期，文章编号207402，2008。[3] X. Ni、Z. J. Wong、M. Mrejen、Y. Wang 和 X. Zhang，“用于可见光的超薄隐形皮肤斗篷”，《科学》，第349卷，第6254期，第1310–1314页，2015。[4] X. Ni、A. V. Kildishev 和 V. M. Shalaev，“用于可见光的超表面全息图”，《自然·通讯》，第4卷，第1期，第1–6页，2013。[5] G. Zheng、H. M¨uhlenbernd、M. Kenney、G. Li，等，“效率达80%的超表面全息图”，《自然·纳米技术》，第10卷，第4期，第308–312页，2015。[6] M. Khorasaninejad、W. T. Chen、R. C. Devlin、J. Oh，等，“可见光波长下的超透镜：衍射极限聚焦与亚波长分辨率成像”，《科学》，第352卷，第6290期，第1190–1194页，2016。[7] T. J. Cui、M. Q. Qi、X. Wan、J. Zhao 和 Q. Cheng，“编码超材料、数字超材料与可编程超材料”，*Light: Science & Applications*，第3卷，第10期，第e218–e218页，2014。[8] F. Yang 和 Y. Rahmat-Samii，表面电磁学：天线、微波与光学工程中的应用，剑桥大学出版社，2019。[9] T. J. Cui、S. Liu 和 L. Zhang，“信息超材料与超表面”，《材料化学杂志*C*》，第5卷，第15期，第3644–3668页，2017。[10] H. Yang, X. Cao, F. Yang, J. Gao 等，《一种可动态控制偏振、散射和聚焦的可编程超表面》，《科学报告》，第6卷，第1期，第1–11页，2016年。[11] L. Li, T. J. Cui, W. Ji, S. Liu 等，《电磁可重编程编码超表面全息图》，《自然·通讯》，第8卷，第1期，第1–7页，2017年。[12] Z. Wang, X. Pan, F. Yang, S. Xu 等，《基于1位可编程超表面的高性能轨道角动量波束设计、分析与实验》，IEEE Access，第9卷，第18585–18596页，2021年。[13] H. Yang, F. Yang, S. Xu, M. Li 等，《可重构反射阵天线的相位量化效应研究》，IEEE天线与无线传播快报，第16卷，第302–305页，2016年。[14] B. Wu, A. Sutinjo, M. E. Potter 和 M. Okoniewski，《动态数字微机电系统反射阵列控制比特数的选择》，IEEE天线与无线传播快报，第7卷，第183–186页，2008年。[15] P. Nayeri, F. Yang 和 A. Z. Elsherbeni，《波束扫描反射阵天线：技术概述与最新进展》，IEEE《天线与传播杂志》，第57卷，第4期，第32–47页，2015年。[16] S. V. Hum 和 J. Perruisseau-Carrier，《用于动态天线波束控制的可重构反射阵列和阵列透镜：综述》，《IEEE天线与传播汇刊》，第62卷，第198、1831–1844页，2013年。[17] H. Yang, F. Yang, S. Xu, Y. Mao 等，《1位可重构反射阵天线：设计、优化与实验》，《IEEE天线与传播汇刊》，第64卷，第6期，第2246–2254页，2016年。 10×10 H. Yang, F. Yang, X. Cao, S. Xu 等，《X/Ku波段1600单元双频电子可重构反射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第65卷，第6期，第3024–3032页，2017年。[18] H. Kamoda, T. Iwasaki, J. Tsumochi, T. Kuki 和 O. Hashimoto，《采用单比特移相器的60 GHz电子可重构大尺寸反射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第59卷，第7期，第2524–2531页，2011年。[19] X. Pan, S. Wang, G. Li, S. Xu 和 F. Yang，《用于W波段二维波束转向的片上可重构反射阵》，载于2018 IEEE MTT-S 国际无线研讨会（IWS），IEEE，第1–4页，2018年。[20] X. Pan, F. Yang, S. Xu 和 M. Li，《具有快速可转向单脉冲方向图的10240单元可重构反射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第69卷，第1期，第173–181页，2020年。[21] B. J. Xiang, X. Dai 和 K.-M. Luk，《一种具有1位分辨率的宽带低成本可重构反射阵天线》，《IEEE天线与传播汇刊》，第70卷，第9期，第7439–7447页，2022年。[22] F. Wu, R. Lu, J. Wang, Z. H. Jiang 等，《基于电磁单元旋转的圆极化1位电子可重构反射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第69卷，第9期，第5585–5595页，2021年。[23] M. Cerveny, K. L. Ford 和 A. Tennant，《基于PIN二极管超表面的反射式可切换极化旋转器》，《IEEE天线与传播汇刊》，第69卷，第1483–1492页，2020年。[24] Z. Wang, Y. Ge, J. Pu, X. Chen 等，《一种基于PIN二极管、用于宽角度波束扫描应用的1位电子可重构折叠反射阵天线》，《IEEE天线与传播汇刊》，第68卷，第9期，第6806–6810页，2020年。[25] M.-T. Zhang, S. Gao, Y.-C. Jiao, J.-X. Wan 等，《面向Ku波段卫星天线应用的单比特相位分辨率新型可重构反射阵列设计》，《IEEE天线与传播汇刊》，第64卷，第5期，第1634–1641页，2016年。[26] F. Wu, R. Lu, J. Wang, Z. H. Jiang 等，《X波段圆极化1位可重构磁电偶极子反射阵列》，IEEE天线与无线传播快报，第21卷，第3期，第496–500页，2021年。

和无线传播快报，第21卷，第3期，第496–500页，2021年。[28] H. Yang, F. Yang, S. Xu, M. Li 等，《面向可重构大孔径天线的1位多极化反射阵单元》，IEEE天线与无线传播快报，第16卷，第581–584页，2016年。[29] C. Liu, Y. Wu, F. Yang, S. Xu 和 M. Li，《能否设计出采用单个开关的1位可重构透射阵列单元？》，IEEE天线与无线传播快报，待刊，2022年。[30] A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier 和 P. Pouliguen，《一种基于PIN二极管、用于 x波段透反射阵应用的1位可重构单元》，《IEEE天线与传播汇刊》，第60卷，第5期，第2260–2269页，2012年。[31] A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier 和 P. Pouliguen，《X波段宽带400单元电子可重构透射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第61卷，第10期，第5017–5027页，2013年。[32] M. Wang, S. Xu, N. Hu, W. Xie 等，《采用16个带PIN二极管的O形槽贴片单元的Ku波段方向图可重构阵列天线的设计与测量》，IEEE天线与无线传播快报，第19卷，第12期，第2373–2377页，2020年。[33] Y. Wang, S. Xu, F. Yang 和 M. Li，《一种采用等效磁偶极子单元的新型宽角度波束扫描可重构透射阵天线》，《IEEE天线与传播汇刊》，第68卷，第7期，第5691–5695页，2020年。[34] M. Wang, S. Xu, F. Yang 和 M. Li，《采用缝隙耦合单元的Ku波段1位可重构透射阵列设计》，载于2017 IEEE天线与传播国际研讨会暨USNC/URSI全国无线电科学会议，IEEE，第1991–1992页，2017年。16×16 C.-W. Luo, G. Zhao, Y.-C. Jiao, G.-T. Chen 和 Y.-D. Yan，《基于极化旋转单元的宽带1位可重构透射阵天线》，IEEE天线与无线传播快报，第20卷，第5期，第798–802页，2021年。[35] H. Yu, J. Su, Z. Li 和 F. Yang，《一种采用透射超表面极化器的新型宽带高效率电子扫描透射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，第70卷，第4期，第3088–3093页，2021年。[36] B. D. Nguyen 和 C. Pichot，《加载PIN二极管的线极化1位可重构透射阵列单元》，IEEE天线与无线传播快报，第18卷，第1期，第98–102页，2018年。[37] C.-W. Luo, G. Zhao, Y.-C. Jiao, G.-T. Chen 和 Y.-D. Yan，《基于极化旋转单元的宽带1位可重构透射阵天线》，IEEE天线与无线传播快报，第20卷，第5期，第798–802页，2021年。[38] X. Wang, P.-Y. Qin, A. T. Le, H. Zhang 等，《采用可重构双层惠更斯单元的波束扫描透射阵列》，《IEEE天线与传播汇刊》，待刊，2022年。[39] M. Wang, S. Xu, F. Yang 和 M. Li，《采用带PIN二极管的单层缝隙单元的1位双向可重构透反射阵》，《IEEE天线与传播汇刊》，第67卷，第9期，第6205–6210页，2019年。[40] Q. R. Hong, Q. Ma, X. X. Gao, C. Liu 等，《具有多频调制功能的可编程幅度编码超表面》，先进智能系统，第3卷，第8期，文章编号2000260，2021年。[41] Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu 等，《有源RIS与无源RIS：谁将在6G中胜出？》，IEEE通信汇刊，待刊，2022年。[42] J. Lin 和 T. Itoh，《有源集成天线》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第42卷，第2186–2194页，1994年。[43] M. Kim, E. A. Sovero, J. B. Hacker, M. P. De Lisio 等，《一种100单元异质结双极晶体管栅格放大器》，《IEEE微波理论与技术汇刊》

与技术，第41卷，第10期，第1762–1771页，1993年。[45] M. Kim、E. A. Sovero、J. B. Hacker、M. P. De Lisio 等，“栅格放大器”，IEEE微波与导波信件，第1卷，第11期，第322–324页，1991年。[46] M. E. Bialkowski、A. W. Robinson 和 H. J. Song，“X波段放大型反射阵列的设计、开发与测试”，《IEEE天线与传播汇刊》，第50卷，1076，2002年 8，1065第。第 – 。[47] X. Chen 和 F. Yang，“非线性电磁表面：理论、设计与应用”，硕士论文，清华大学，2020年。[48] H. Jeong、D. H. Le、D. Lim、R. Phon 和 S. Lim，“用于频率选择性吸收的可重构超表面”，《先进光学材料》，第8卷，第13期，文章编号1902182，2020年。[49] B. Zhu、C. Huang、Y. Feng、J. Zhao 和 T. Jiang，“双频可切换超材料电磁吸收器”，《电磁学研究进展B》，第24卷，第121–129页，2010年。[50] Y. Li、J. Lin、H. Guo、W. Sun 等，“具有可切换功能的可调超表面：从完全透明到完全吸收”，《先进光学材料》，第8卷，第6期，文章编号1901548，2020年。[51] B. Zhu、Y. Feng、J. Zhao、C. Huang 和 T. Jiang，“用于不同偏振电磁波的可切换超材料反射器/吸收器”，《应用物理学快报》，第97卷，051906，2010年 5，第。文章编号 。[52] S. Ghosh 和 K. V. Srivastava，“偏振不敏感的单频段及宽带可切换吸收器/反射器及其新型偏置技术实现”，《IEEE天线与传播汇刊》，第64卷，第8期，第3665–3670页，2016年。[53] P. M. Sainadh、A. Sharma 和 S. Ghosh，“具有嵌入式偏置的偏振不敏感吸收式/透射式可重构频率选择表面”，《IEEE天线与无线传播快报》，即将刊出，2022年。[54] C. X. Huang、J. Zhang、Q. Cheng 和 T. J. Cui，“基于超表面的无线通信偏振调制”，《先进功能材料》，第31卷，第36期，文章编号2103379，2021年。[55] F. Ding、S. Tang 和 S. I. Bozhevolnyi，“偏振编码光学超表面的最新进展”，《先进光子学研究》，第2卷，第6期，文章编号2000173，2021年。[56] Y. Hu、X. Wang、X. Luo、X. Ou 等，“用于偏振操控的全介质超表面：原理与新兴应用”，《纳米光子学》，第9卷，第12期，第3755–3780页，2020年。[57] T. Lv、Y. Li、H. Ma、Z. Zhu 等，“基于VO_2相变的混合超材料开关，用于操控手性”，《科学报告》，第6卷，第1期，第1–9页，2016年。[58] K. Chen、Y. Feng、L. Cui、J. Zhao 等，“有源手性超材料对非对称电磁波传输的动态控制”，《科学报告》，第7卷，第1期，第1–10页，2017年。[59] H. Yu、X. Cao、J. Gao、H. Yang 等，“利用可操控超表面设计宽带可重构偏振转换器”，《光学材料快报》，第8卷，第11期，第3373–3381页，2018年。[60] X. Ma、W. Pan、C. Huang、M. Pu 等，“用于偏振操控的有源超材料”，《先进光学材料》，第2卷，第10期，第945–949页，2014年。[61] A. Edalati 和 T. A. Denidni，“用于波束切换应用的频率选择表面”，《IEEE天线与传播汇刊》，第61卷，第1期，第195–200页，2012年。[62] B. Liang、B. Sanz-Izquierdo、E. A. Parker 和 J. C. Batchelor，“用于波束切换应用的圆柱形缝隙频率选择表面结构”，《IEEE天线与传播汇刊》，第63卷，第1期，第166–173页，2014年。[63] R. Y. Wu、L. Zhang、L. Bao、L. W. Wu 等，“采用相位编码和反射–透射幅度编码的数字超表面，用于

灵活的全空间电磁操控”，《先进光学材料》，第7卷，第8期，文章编号1801429，2019年。[64] W.-J. Liao、Y.-F. Chen、C.-L. Liao 和 Y.-C. Hou，“基于对偶定理单元、具有互补反射与透射响应的可重构频率选择表面”，《IEEE天线与传播汇刊》，即将刊出，2022年。[65] M. P. DeLisio 和 R. A. York，“准光学与空间功率合成”，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第50卷，第3期，第929–936页，2002年。[66] P. Rocca、Q. Zhu、E. T. Bekele、S. Yang 和 A. Massa，“作为认知无线电系统赋能技术的四维阵列”，《IEEE天线与传播汇刊》，第62卷，第3期，第1102–1116页，2013年。[67] A. Shaltout、A. Kildishev 和 V. Shalaev，“时变超表面与洛伦兹非互易性”，《光学材料快报》，第5卷，第11期，第2459–2467页，2015年。[68] Z. Liu、Z. Li 和 K. Aydin，“基于石墨烯微带阵列的时变超表面”，《ACS 光子学》，第3卷，第11期，第2035–2039页，2016年。[69] Y. Hadad、D. L. Sounas 和 A. Alu，“时空梯度超表面”，《物理评论B》，第92卷，第10期，文章编号100304，2015年。[70] S. Taravati 和 G. V. Eleftheriades，“纯线性频率转换时域超表面”，《物理评论应用》，第15卷，第6期，文章编号064011，2021年。[71] C. Huang、B. Sun、W. Pan、J. Cui 等，“基于2比特数字控制编码超表面的动态波束操控”，《科学报告》，第7卷，第1期，第1–8页，2017年。[72] B. D. Nguyen、V.-S. Tran、L. Mai 和 P. Dinh-Hoang，“一种采用开口环贴片耦合延迟线的双比特反射阵列单元”，《REV电子与通信期刊》，第6卷，第1–2期，2016年。[73] F. Diaby、A. Clemente、R. Sauleau、K. T. Pham 和 L. Dussopt，“ka波段的2位可重构单元与电子可扫描透射阵列”，《IEEE天线与传播汇刊》，第68卷，第6期，第5003–5008页，2019年。[74] C.-C. Cheng 和 A. Abbaspour-Tamijani，“基于双比特天线-滤波器-天线单元的可扫描反射阵列设计与实验验证”，载于2009年IEEE MTT-S国际微波研讨会文摘，IEEE，第1181–1184页，2009年。[75] Q. Zhang、M. Zhang、X. Shi、S. Gao 等，“用于Ka波段卫星通信的低剖面波束扫描反射阵列，集成漏波馈源并具有2位相位分辨率”，《IEEE天线与传播汇刊》，第70卷，第3期，第1884–1894页，2021年。[76] X. Yang、S. Xu、F. Yang 和 M. Li，“一种适用于线偏振和圆偏振的新型2位可重构反射阵列单元”，载于2017年IEEE天线与传播国际研讨会暨USNC/URSI全国无线电科学会议，IEEE，第2083 2084页，2017年 – 。[77] L. Chen、Q. Ma、H. B. Jing、H. Y. Cui 等，“基于有源放大器的空间能量数字编码超表面”，《物理评论应用》，第11卷，第5期，文章编号054051，2019年。[78] J. Cui、C. Huang、W. Pan、M. Pu 等，“利用各向异性超镜动态操控电磁偏振”，《科学报告》，第6卷，第1期，第1–9页，2016年。[79] C. Huang、J. Liao、C. Ji、J. Peng 等，“用于独立操控反射幅度与相位的石墨烯集成可重构超表面”，《先进光学材料》，第9卷，第7期，文章编号2001950，2021年。[80] J. Liao、S. Guo、L. Yuan、C. Ji 等，“通过单层可重构超表面独立操控反射幅度与相位”，《先进光学材料》，第10卷，第4期，文章编号2101551，2022年。[81] K. K. Kishor 和 S. V. Hum，“一种放大型可重构反射阵天线”，《IEEE天线与传播汇刊》，第60卷，第1期，197–205页，2011年。[82] J. Perruisseau-Carrier，《具有动态相位控制的双极化和极化灵活反射单元》，《IEEE天线与传播汇刊》，第58卷，第5期，1494–1502页，2010年。[83] T. Debogovi´c、S. Su˘sac 和 J. Perruisseau-Carrier，《具有1比特相位控制和极化灵活性的简单反射阵单元》，载于2013年第7届欧洲天线与传播会议（EuCAP），Ieee，第2717–2720页，2013年。[84] W. Pan、C. Huang、X. Ma、B. Jiang 和 X. Luo，《X波段具有1位相位分辨率的双线极化透射阵单元》，IEEE天线与无线传播快报，第14卷，170，2014年，第167页–。[85] C. Huang、W. Pan、X. Ma 和 X. Luo，《X波段1位可重构圆极化透射阵列》，IEEE天线与无线传播快报，第15卷，第448–451页，2015年。[86] G. Liu、H. Liu、J. Han、Y. Mu 和 L. Li，《用于反射和透射波前的与极化无关操控的可重构超表面》，Journal of Physics D: Applied Physics，第53卷，第4期，文章编号045107，2019年。[87] Q. Hu、J. Zhao、K. Chen、K. Qu 等，《智能可编程全向超表面》，《激光与光子学评论》，即将出版，文章编号2100718，2022年。[88] H. Yu、P. Li、J. Su、Z. Li 等，《具有透射阵列、反射阵列和透射-反射阵列模式切换功能的可重构双向波束转向孔径》，《IEEE天线与传播汇刊》，即将出版，2022年。[89] R. Phon、S. Ghosh 和 S. Lim，《新型多功能可重构有源频率选择表面》，《IEEE天线与传播汇刊》，第67卷，第3期，1709–1718页，2018年。[90] X. Song、W. Yang、K. Qu、X. Bai 等，《利用PIN二极管实现近乎完美反射、透射和吸收的可切换超表面》，Optics Express，第29卷，第18期，29320–29328页，2021年。[91] L. Chen、Q. Ma、Q. F. Nie、Q. R. Hong 等，《用于近场信息编码与传输的双极化可编程超表面调制器》，Photonics Research，第9卷，124，2021年，第2期，116页–。[92] L. Zhang、X. Q. Chen、S. Liu、Q. Zhang 等，《时空编码数字超表面》，《自然·通讯》，第9卷，11，2018年，第1期，1页–。[93] J. Y. Dai、J. Zhao、Q. Cheng 和 T. J. Cui，《通过时域数字编码超表面独立控制谐波幅度与相位》，Light: Science & Applications，第7卷，10，2018年，第1期，1页–。[94] J. Zhao、X. Yang、J. Y. Dai、Q. Cheng 等，《用于非线性谐波调控和新型无线通信系统的可编程时域数字编码超表面》，National Science Review，第6卷，第2期，231–238页，2019年。[95] L. Zhang、M. Z. Chen、W. Tang、J. Y. Dai 等，《一种基于数字超表面的空分与频分复用无线通信方案》，Nature Electronics，第4卷，第3期，218–227页，2021年。[96] M. Z. Chen、W. Tang、J. Y. Dai、J. C. Ke 等，《利用时域数字编码超表面对谐波幅度与相位进行精确宽带调控，实现256-QAM毫米波无线通信》，National Science Review，第9卷，第1期，文章编号nwab134，2022年。[97] X. Wang、J. Han、S. Tian、D. Xia 等，《利用透射式时空编码超表面对非线性电磁波进行放大与调控并增强非互易性》，Advanced Science，第9卷，第11期，文章编号2105960，2022年。[98] Q. Hu、K. Chen、N. Zhang、J. Zhao 等，《基于时变超表面的任意动态庞加莱˙球偏振转换器》，《先进光学材料》，第10卷，第4期，文章编号2101915，

2022年。[99] Q. Hu、K. Chen、J. Zhao、S. Dong、等，《按需动态偏振超变换器》，《激光与光子学评论》，即将出版，文章编号2200479，2022年。[100] M. Liu、D. A. Powell、Y. Zarate 和 I. V. Shadrivov，《用于参量波的惠更斯超构器件》，《物理评论*X*》，第8卷，第3期，文章编号031077，2018年。[101] C. Guclu、J. Perruisseau-Carrier 和 O. Civi，《双频圆极化射频微机电系统波束切换反射阵列天线的概念验证》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第60卷，第11期，5451–5455页，2012年。[102] E. Baladi、M. Y. Xu、N. Faria、J. Nicholls 和 S. V. Hum，《用于卫星应用的双频圆极化全可重构反射阵天线》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第69卷，第12期，8387–8396页，2021年。[103] T. Debogovic 和 J. Perruisseau-Carrier，《低损耗微机电系统可重构1位双线极化反射阵单元》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第62卷，第10期，5055–5060页，2014年。[104] X. G. Zhang、Q. Yu、W. X. Jiang、Y. L. Sun、等，《偏振控制双可编程超表面》，*Advanced Science*，第7卷，第11期，文章编号1903382，2020年。[105] L. Yan、W. Zhu、M. F. Karim、H. Cai、等，《通过单层超表面原位实现任意且独立的偏振控制》，《先进光学材料》，第6卷，第21期，文章编号1800728，2018年。[106] H. Xu、S. Xu、F. Yang 和 M. Li，《具有独立大角度波束扫描能力的双频1位可重构反射阵天线的设计与实验》，*IEEE*天线与无线传播快报，第19卷，第11期，1896–1900页，2020年。[107] Y. Wang、S. Xu、F. Yang 和 D. H. Werner，《采用非对称偶极子单元和寄生旁路偶极子的1位双线极化可重构透射阵天线》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第69卷，第2期，1188–1192页，2020年。[108] X. Zhang、F. Yang、S. Xu 和 M. Li，《具有独立双圆极化波束控制的单层反射阵天线》，*IEEE*天线与无线传播快报，第19卷，第4期，532–536页，2020年。[109] J. B. Mueller、N. A. Rubin、R. C. Devlin、B. Groever 和 F. Capasso，《超表面偏振光学：对任意正交偏振态进行独立相位控制》，《物理评论快报》，第118卷，第11期，文章编号113901，2017年。[110] C. S. Geaney、M. Hosseini 和 S. V. Hum，《用于独立双线极化与圆极化控制的反射阵天线》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第67卷，第9期，5908–5918页，2019年。[111] S. Mener、R. Gillard、R. Sauleau、A. Bellion 和 P. Potier，《具有独立偏振控制的双圆极化反射阵》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第63卷，第4期，1877–1881页，2015年。[112] H. Li、Q. Cao 和 Y. Wang，《用于LTE 2.1 GHz的全新2比特多功能有源频率选择表面》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第65卷，第6期，3084–3092页，2017年。[113] H. Li、Q. Cao、L. Liu 和 Y. Wang，《改进型多功能有源频率选择表面》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第66卷，第4期，1854–1862页，2018年。[114] Y. Li、Y. Wang 和 Q. Cao，《用于偏振与传播调控的多功能可重构超表面设计》，*IEEE Access*，第7卷，129183–129191页，2019年。[115] L. W. Wu、H. F. Ma、R. Y. Wu、Q. Xiao、等，《利用可重构各向异性数字编码超表面对电磁全息图进行透射-反射控制和偏振控制》，《先进光学材料》，第8卷，第22期，文章编号2001065，2020年。[116] Q. Ma、L. Chen、H. B. Jing、Q. R. Hong、等，《可控以及基于可拆卸数字编码超表面的可编程非互易性”，《先进光学材料》，第7卷，第24期，文章编号1901285，2019年。[117] K. Chen、G. Ding、G. Hu、Z. Jin等，“定向Janus超表面”，《先进材料》，第32卷，第2期，文章编号1906352，2020年。[118] P. Yu、J. Li、S. Zhang、Z. Jin等，“可见光谱区域中的动态Janus超表面”，《纳米快报》，第18卷，4589，2018年7，4584第。页码–。[119] S. M. Kamali、E. Arbabi、A. Arbabi、Y. Horie等，“角度复用超表面：在不同照明角度下，于单个超表面中编码独立波前”，《物理评论X》，第7卷，第4期，文章编号041056，2017年。[120] Y. Bao、Y. Yu、H. Xu、Q. Lin等，“用于多维光学控制多种打印图像切换与编码的超表面相干像素设计”，《先进功能材料》，第28卷，第51期，文章编号1805306，2018年。[121] E. Wang、J. Niu、Y. Liang、H. Li等，“对多通道、角度复用及任意空间变化偏振场的完全控制”，《先进光学材料》，第8卷，第6期，文章编号1901674，2020年。[122] J. Jang、G.-Y. Lee、J. Sung和B. Lee，“用于角度复用超全息图的独立多通道波前调制”，《先进光学材料》，第9卷，第17期，文章编号2100678，2021年。[123] S. Wan、C. Wan、C. Dai、Z. Li等，“角度复用超表面：为角度照明构建独立编码的振幅/相位字典”，《先进光学材料》，第9卷，第22期，文章编号2101547，2021年。[124] R. Pereira、R. Gillard、R. Sauleau、P. Potier等，“适用于X波段反射阵列应用、分辨率接近2位的双线性偏振单元”，《IEEE天线与传播汇刊》，第60卷，第12期，页码6042–6048，2012年。[125] S. Venkatesh、X. Lu、H. Saeidi和K. Sengupta，“一种基于拼接式CMOS芯片的高速、可编程、可扩展太赫兹全息超表面”，Nature Electronics，第3卷，第12期，页码785–793，2020年。[126] H.-T. Chen、W. J. Padilla、J. M. Zide、A. C. Gossard等，“有源太赫兹超材料器件”，《自然》，第444卷，第7119期，页码597–600，2006年。[127] H.-T. Chen、W. J. Padilla、M. J. Cich、A. K. Azad等，“一种超材料固态太赫兹相位调制器”，《自然·光子学》，第3卷，第3期，页码148–151，2009年。[128] H. Xu、S. Xu、F. Yang、M. Li等，“具有独立控制1位相位单元的太赫兹可重构反射阵列设计”，载于2019年IEEE天线与传播国际研讨会及USNC-URSI无线电科学会议，IEEE，页码309–310，2019年。[129] Y. Zhang、Y. Zhao、S. Liang、B. Zhang等，“通过增强谐振有源HEMT超表面实现太赫兹波的大相位调制”，《纳米光子学》，第8卷，第1期，页码153–170，2019年。[130] Y. Zhang、S. Qiao、S. Liang、Z. Wu等，“基于双通道异质结构复合超材料的Gbps太赫兹外部调制器”，《纳米快报》，第15卷，第5期，页码3501–3506，2015年。[131] Y. Zhao、L. Wang、Y. Zhang、S. Qiao等，“基于有源3纳米二维电子气超表面内可调集体—个体态转换的高速高效太赫兹调制”，《纳米快报》，第19卷，第11期，页码7588–7597，2019年。[132] P. Singh和S. Sonkusale，“基于可调太赫兹槽波导的片上高速太赫兹调制器”，《科学报告》，第7卷，第1期，页码1–8，2017年。[133] P. Q. Liu、I. J. Luxmoore、S. A. Mikhailov、N. A. Savostianova等，“采用与石墨烯表面等离激元强耦合的开口环谐振器的高度可调混合超材料”，《自然·通讯》，第6卷，第1期，页码1–7，2015年。

[134] Z. Chen、X. Chen、L. Tao、K. Chen等，“用于超宽带太赫兹调制的石墨烯控制布儒斯特角器件”，《自然·通讯》，第9卷，第1期，页码1–7，2018年。[135] Y. Liu、T. Sun、Y. Xu、X. Wu等，“基于CMOS技术实现的有源可调太赫兹超材料阵列”，Journal of Physics D: Applied Physics，第54卷，第8期，文章编号085107，2020年。[136] N. M. Monroe、G. C. Doqiamis、R. Stingel、P. Myers等，“用于高角分辨率工作的电子太赫兹铅笔波束形成与二维转向：一种 98×98单元、265 GHz CMOS反射阵列，具备单元内数字波束成形和波束斜视校正”，载于2022年IEEE国际固态电路会议（ISSCC），IEEE，第65卷，页码1–3，2022年。[137] Y. Zhao、Y. Zhang、Q. Shi、S. Liang等，“通过二氧化钒耦合纳米结构动态光诱导控制太赫兹波的大相移”，《ACS 光子学》，第5卷，第8期，页码3040–3050，2018年。[138] B. Chen、J. Wu、W. Li、C. Zhang等，“具有非易失性存储器的可编程太赫兹超材料”，Laser & Photonics Reviews，第16卷，第4期，文章编号2100472，2022年。[139] B. Chen、X. Wang、W. Li、C. Li等，“电寻址集成智能太赫兹超表面”，《科学进展》，第8卷，第41期，文章编号eadd1296，2022年。[140] A. M. Shaltout、V. M. Shalaev和M. L. Brongersma，“利用有源超表面进行时空光控制”，《科学》，第364卷，第6441期，文章编号eaat3100，2019年。[141] Y.-W. Huang、H. W. H. Lee、R. Sokhoyan、R. A. Pala等，“栅极可调导电氧化物超表面”，《纳米快报》，第16卷，第9期，页码5319–5325，2016年。[142] J. Li、P. Yu、H. Cheng、W. Liu等，“利用石墨烯负载等离激元超表面进行光学偏振编码”，《先进光学材料》，第4卷，第1期，页码91–98，2016年。[143] Q. Wang、E. T. Rogers、B. Gholipour、C.-M. Wang等，“基于相变材料的光学可重构超表面与光子器件”，《自然·光子学》，第10卷，第1期，页码60–65，2016年。[144] A. Karvounis、B. Gholipour、K. F. MacDonald和N. I. Zheludev，“全介质相变可重构超表面”，《应用物理学快报》，第109卷，第5期，文章编号051103，2016年。[145] X. Yin、M. Schaferling、A.-K. U. Michel、A. Tittl等，“有源手性等离激元学”，《纳米快报》，第15卷，第7期，页码4255–4260，2015年。[146] Y. Wang、P. Landreman、D. Schoen、K. Okabe等，“相变天线与超表面的电调谐”，《自然·纳米技术》，第16卷，第6期，页码667–672，2021年。[147] Q.-W. Lin、H. Wong、L. Huitema和A. Crunteanu，“基于相变材料光激活、具备重构能力的编码超表面及其太赫兹波束操控”，《先进光学材料》，第10卷，第1期，文章编号2101699，2022年。[148] Y. Zhang、C. Fowler、J. Liang、B. Azhar等，“采用低损耗光学相变材料的电重构非易失性超表面”，《自然·纳米技术》，第16卷，第6期，页码661–666，2021年。[149] S.-Q. Li、X. Xu、R. Maruthiyodan Veetil、V. Valuckas等，“基于可调介质超表面的纯相位透射式空间光调制器”，《科学》，第364卷，第6445期，页码1087–1090，2019年。[150] J. Karst、M. Floess、M. Ubl、C. Dingler等，“电控可切换金属聚合物纳米天线”，《科学》，第374卷，第6567期，页码612–616，2021年。[151] R. D. Meade、K. D. Brommer、A. M. Rappe和J. Joannopoulos，“二维光子带隙的存在性”，《应用物理学快报》，第61卷，第4期，页码495–497，1992年。[152] M. Tokushima、H. Kosaka、A. Tomita和H. Yamada，“光波通过弯曲120度的单线缺陷光子晶体波导传播”，Applied Physics Letters，第76卷，954，2000年8，952第。页码–。

[153] Y. Akahane、T. Asano、B.-S. Song 和 S. Noda，《二维光子晶体中的高 Q 光子纳米腔》，《自然》，第425卷，第6961期，第944–947页，2003年。[154] K. Sakoda，《光子晶体的光学特性》，Springer Science & Business Media，第80卷，2004年。[155] A. B. Khanikaev、S. Hossein Mousavi、W.-K. Tse、M. Kargarian 等，《光子拓扑绝缘体》，《自然·材料》，第12卷，第3期，第233–239页，2013年。[156] L. Lu、J. D. Joannopoulos 和 M. Solja˘ci´c，《拓扑光子学》，《自然·光子学》，第8卷，第11期，第821–829页，2014年。[157] Y. Yang、Y. Yamagami、X. Yu、P. Pitchappa 等，《用于片上通信的太赫兹拓扑光子学》，《自然·光子学》，第14卷，第7期，第446–451页，2020年。[158] D. Sievenpiper、L. Zhang、R. F. Broas、N. G. Alexopolous 和 E. Yablonovitch，《具有禁带的高阻抗电磁表面》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第47卷，第11期，第2059–2074页，1999年。[159] F.-R. Yang、K.-P. Ma、Y. Qian 和 T. Itoh，《一种单平面紧凑型光子带隙（uc-pbg）结构及其在微波电路中的应用》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第47卷，第8期，第1509–1514页，1999年。[160] F. Yang 和 Y. Rahmat-Samii，《集成电磁带隙（ebg）结构的微带天线：一种用于阵列应用的低互耦设计》，《IEEE天线与传播汇刊》，第51卷，第10期，第2936–2946页，2003年。[161] F. Yang 和 Y. Rahmat-Samii，《天线工程中的电磁带隙结构》，剑桥大学出版社，剑桥，英国，2009年。[162] S. Sun、Q. He、S. Xiao、Q. Xu 等，《梯度折射率超表面：连接传播波与表面波的桥梁》，《自然·材料》，第11卷，第5期，第426–431页，2012年。[163] B. H. Fong、J. S. Colburn、J. J. Ottusch、J. L. Visher 和 D. F. Sievenpiper，《标量和张量全息人工阻抗表面》，《IEEE天线与传播汇刊》，第58卷，第10期，第3212–3221页，2010年。[164] D. F. Sievenpiper、J. H. Schaffner、H. J. Song、R. Y. Loo 和 G. Tangonan，《利用电调谐阻抗表面实现二维波束扫描》，《IEEE天线与传播汇刊》，第51卷，第10期，第2713–2722页，2003年。[165] J. W. You、Q. Ma、Z. Lan、Q. Xiao 等，《具有超快控制能力的可重编程等离激元拓扑绝缘体》，《自然·通讯》，第12卷，第1期，第1–7页，2021年。[166] Z. B. Popovic、R. M. Weikle、M. Kim 和 D. B. Rutledge，《100单元MESFET平面栅格振荡器》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第39卷，第2期，第193–200页，1991年。[167] R. Weikle、M. Kim、J. B. Hacker、M. P. De Lisio 和 D. B. Rutledge，《采用栅极反馈的平面MESFET栅格振荡器》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第40卷，第11期，第1997–2003页，1992年。[168] C. F. Jou、W. W. Lam、H. Z. Chen、K. S. Stolt 等，《毫米波二极管栅格倍频器》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第36卷，第11期，第1507–1514页，1988年。[169] J. B. Hacker、R. M. Weikle、M. Kim、M. P. De Lisio 和 D. B. Rutledge，《100单元平面肖特基二极管栅格混频器》，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第40卷，第3期，第557–562页，1992年。[170] J. Lee、M. Tymchenko、C. Argyropoulos、P.-Y. Chen 等，《与子带间跃迁耦合的等离激元超表面产生巨大非线性响应》，《自然》，第511卷，第7507期，第65–69页，2014年。[171] G. Li、S. Chen、N. Pholchai、B. Reineke 等，《谐波产生非线性相位的连续控制》，《自然·材料》，第14卷，第6期，第607–612页，2015年。

[172] W. Ye、F. Zeuner、X. Li、B. Reineke，等，《自旋与波长复用的非线性超表面全息术》，《自然·通讯》，第7卷，第1期，第1–7页，2016年。[173] E. Almeida、O. Bitton 和 Y. Prior，《用于全息术的非线性超材料》，《自然·通讯》，第7卷，第1期，第1–7页，2016年。[174] Z. Wang、Z. Wang、J. Wang、B. Zhang，等，《无偏置场时的旋磁响应》，《美国国家科学院院刊》，第109卷，第33期，第13194–13197页，2012年。[175] S. Taravati、B. A. Khan、S. Gupta、K. Achouri 和 C. Caloz，《非互易、非旋磁的无磁超表面》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，第65卷，第7期，第3589–3597页，2017年。[176] A. E. Cardin、S. R. Silva、S. R. Vardeny、W. J. Padilla，等，《时空调制超表面中的表面波辅助非互易性》，《自然·通讯》，第11卷，第1期，第1–9页，2020年。[177] X. Wang、A. Diaz-Rubio、H. Li、S. A. Tretyakov 和 A. Alu，《多功能时空超表面的理论与设计》，《物理评论应用》，第13卷，第4期，文章编号044040，2020年。[178] S. Taravati 和 G. V. Eleftheriades，《利用时域调制相位梯度超表面实现全双工非互易波束扫描》，《物理评论应用》，第14卷，第1期，文章编号014027，2020年。[179] R. E. Meymand、A. Soleymani 和 N. Granpayeh，《太赫兹区域石墨烯基超表面中基于相干完美吸收的全光与、或、异或逻辑门》，《光学通讯》，第458卷，文章编号124772，2020年。[180] N. Hu、Y. Zhao、J. Zhang、P. Liu，等，《基于等效电路设计方法的高性能能量选择表面》，《*IEEE*天线与传播汇刊》，即将出版，2021年。[181] H. Wakatsuchi、S. Kim、J. J. Rushton 和 D. F. Sievenpiper，《波形依赖型吸收超表面》，《物理评论快报》，第111卷，第24期，文章编号245501，2013年。