文章编号：1007 - 4252(2022)01 - 0001 - 007

超导超材料研究进展

段思宇[1]，吴敬波[1,2,*]，范克彬[1,2]，张彩虹[1,2]，金飚兵[1,2]，陈　健[1,2]，吴培亨[1,2]
(1.南京大学 电子科学与工程学院，超导电子学研究所，南京 210023；2. 紫金山实验室，南京 211111)

摘要： 超材料作为一种人工电磁材料，展现了强大的电磁调控能力。超导材料由于具有低损耗、抗磁性、宏观量子效应、可调谐等特性，在超材料的研究中展现了独特的优势。本文对超导超材料的研究进展进行了总结。首先，总结了各种类型超导超材料的发展现状。接下来，对超导超材料在科学研究和工程中的应用进行了介绍。最后对超导超材料的发展趋势进行了展望。

关键词： 超导器件；超材料；等离激元
中图分类号： O511+.9　　**文献标志码：** A

Research progress on superconductor metamaterials

DUAN Siyu[1], WU Jing-bo[1,2,*], FAN Ke-bin[1,2], ZHANG Cai-hong[1,2], JIN Biao-bing[1,2], CHEN Jian[1,2], WU Pei-heng[1,2]
(1. Research Institute Of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

Abstract: As a kind of artificial electromagnetic material, metamaterials have shown powerful capabilities of manipulating electromagnetic waves. Superconducting materials possess specific advantages in the research of metamaterials due to their properties, including low loss, diamagnetism, macroscopic quantum effect, and tuning characteristics. This paper summarizes the research progress of superconducting metamaterials. Firstly, the development status of several types of superconducting metamaterials is categorized and summarized. Next, the applications of superconducting metamaterials in scientific research and engineering are introduced. Finally, the development trend of superconducting metamaterials is prospected.

Key words: Superconducting device; Metamaterial; Plasmon

0　引言

超材料(metamaterials)是一类人工电磁材料，它将人工设计的亚波长结构按照一定的空间排布来实现特定的电磁响应[1-2]。超材料的出现极大地增加了电磁波调控的自由度，它可以实现天然或化学合成材料所不存在的电磁现象，如电磁隐身[3]、涡

收稿日期：2022-02-03；　修订日期：2022-02-17
基金项目：国家自然科学基金(No. 62071217，No. 62027807，No. 6173110，No. 61871212)。
作者简介：段思宇(1994-)，女，博士研究生，主要研究方向为太赫兹技术，超导超材料(E-mail: njudsy@163.com)。
通信作者：吴敬波(1984-)，男，博士，副教授，主要研究方向为太赫兹技术，超材料，超导器件(E-mail: jbwu@nju.edu.cn)。

旋光束产生[4]、超透镜[5-6]、全息成像等[7-8]。通常超材料是采用金属和介质材料制作而成，材料自身的损耗是限制超材料性能的关键因素。如果将外界激励下具有调谐特性的材料集成到超材料单元中，可以构造出可重构[9-10]和可编程[11-12]的超材料，从而实现电磁波的动态调控。利用一些材料对电磁波的奇异响应，也可以构造具有特殊功能的超材料，如非线性超材料[13-14]、记忆超材料[15-16]等。

超导现象是指当某些材料降到一定温度以下，直流电阻突然消失并出现排斥磁场的现象。超导电性由荷兰物理学家昂内斯在 1911 年发现，此后，人们陆续在很多金属、合金和化合物材料中发现了超导现象。超导电性的主要特征包括直流电阻为零、完全的抗磁性和宏观量子效应[17]。超导材料可以分为低温超导材料和高温超导材料。低温超导体一般需要工作在液氦温区甚至更低的温度，常见的低温超导体有铝(Al)、铌(Nb)、铌三锡(Nb_3Sn)、氮化铌(NbN)等，低温超导体被广泛应用于高灵敏探测器[18]、超导量子计算机[19]、强磁体[20]等领域。随着铜氧化物超导体和铁基超导体的发现，超导转变温度在液氮温区的高温超导体受到了广泛的关注[21]。高温超导材料尽管在制备加工和稳定性等方面存在一定的技术挑战，但是在电力输运[22]、储能[23]等方面展现了广阔的应用前景。

随着超材料的兴起，超导材料的优良特性也受到广泛关注，基于超导材料的超材料也得到了较快发展。超导材料在能隙频率以下具有极低的损耗，这有助于解决超材料的损耗难题。2005 年，美国马里兰大学的 Ricci 等人[24]以 Nb 膜为材料，首先在微波频段实现了具有负折射率的超导超材料。超导电性可以通过外加激励，如磁场[25]、泵浦激光[26]、温度[27-28]等手段进行调控，因而超导超材料可以用来实现电磁波的动态调控。利用超导材料的抗磁性制作的超材料可以实现磁场的调控[29]。近年来，具有量子效应的超导超材料也被提出[30]。随着制冷技术的迅速发展，低温设备的体积和成本显著降低，这也为超导材料能得到进一步广泛应用提供了条件。

本文对超导超材料的发展、现状和发展趋势进行了总结。首先，对低损耗和可调谐超导超材料、超导等离激元器件、超导量子超材料和抗磁性超导超材料的原理和发展状况进行了总结。接下来，介绍了超导超材料在科学研究和工程中的应用。最后，对超导超材料的发展趋势进行了展望。

1 低损耗和可调谐的超导超材料

超导材料在超导态和能隙频率以下具有较低的欧姆损耗，非常适合开发低损耗的超材料。超导体具有复数电导率，在热、电、光、磁场等外部激励下，电导率会发生显著变化。因此，超导超材料具有良好的调谐特性。

1.1 低损耗超导超材料

在超材料的研究中，由于材料自身的欧姆损耗，使得许多物理现象和器件性能不能很好地实现。超导材料为开发低损耗、高性能的超材料提供了一种解决方案。尽管高温超导材料具有较高的工作温度，但是由于很多高温超导体是 d 波配对，能隙中存在节点，能隙频率以下的光子也可以破坏超导电子对，导致薄膜损耗很大，因此，在太赫兹波段，YBCO 等高温超导薄膜并不适合用来制作低损耗的超材料。低温超导薄膜在能隙频率以下由于欧姆损耗更低，更适合开发低损耗的超材料。

2005 年，美国马里兰大学 Anlage 课题组[24]采用超导 Nb 膜制备了低损耗的微波段超导超材料。超材料由超导线、超导开口环谐振器和低损耗介质衬底组成。在超导态，该超材料具有负的折射率。由于超导薄膜的低损耗，可以用于开发结构极其紧凑、高 Q 值的超材料。2011 年，Anlage 课题组[31]报道了工作在射频段的紧凑型超导超材料。超材料单元采用平面螺旋线谐振器结构，单元尺寸为自由空间波长的 1/658。通过改变温度或磁场，可以调控超材料的磁响应。

NbN 与 Nb 相比，具有更高的超导转变温度和能隙电压，其能隙频率在 1.2 THz 左右。因此，超导 NbN 薄膜可以用来制作工作频率更高的太赫兹超材料。2012 年，南京大学超导电子学研究所[32]利用超导 NbN 薄膜制备了具有电谐振结构的超导超材料。如图 1 所示，在 8 K 时，超材料传输谱具有非常尖锐的吸收峰，这表明该超材料具有极高的 Q 值。实验得到无载 Q 值高达 178，而同样结构的金属超材料只有 7 左右。对于谐振频率为 1.02 THz 的超导超材料，其无载 Q 值也达到了 90。超导 NbN 超材料在太赫兹频段展现了优异的低损耗特性。

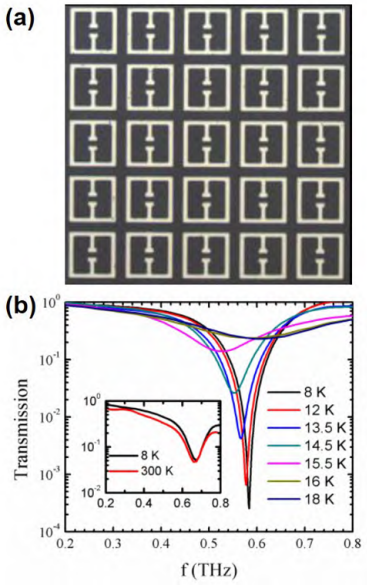

图 1　(a) 高 Q 值太赫兹 NbN 超导超材料的显微镜照片; (b) 不同温度下太赫兹传输谱，插图为同样几何结构的金属超材料的太赫兹传输谱[33]

Fig. 1 (a) Microscopic image of the high Q-factor terahertz NbN superconducting metamaterial; (b) Terahertz transmission spectra at different temperatures, inset shows the terahertz transmission of the metallic metamaterial with the same geometric structure[33]

在超材料中，除了导体材料的欧姆损耗，谐振结构的辐射损耗也是超材料损耗的主要来源。近年来，支持 Fano 谐振、环形偶极子谐振的超导超材料也相继被报道[33]。在这类超材料中，暗膜不能被入射电磁波直接激发，因而没有辐射损耗。2016 年新加坡南洋理工大学 Singh 课题组[33]采用高温超导 YBCO 薄膜，基于低不对称性的开口谐振环结构，开发了一种具有高 Q 值 Fano 谐振的太赫兹超材料。在同样结构的金属超材料中，没有观察到 Fano 谐振，这说明超导超材料相比金属超材料具有更低的损耗。

1.2　可调谐超导超材料

1.2.1 热调控超导超材料

由开口谐振环阵列组成的超材料，其谐振频率 (f_r) 可以表示为 $f_r = 2\pi / (LC)^{1/2}$，其中 L 和 C 分别为谐振器的电感和电容。对于超导超材料，除谐振结构的几何电感外，超导薄膜还存在随温度变化的动态电感。当超导材料从正常态跳变到超导态时，超导薄膜的动态电感会显著增加，使得谐振频率会显著降低。当温度进一步降低，库珀对浓度增大。根据超导二流体模型，超导体的伦敦穿透深度降低，动态电感随之降低，从而导致谐振频率逐渐增加。

利用超导薄膜复数电导率的温度调谐特性可以开发热调控的超材料。2007 年，马里兰大学 Anlage[34]采用 YBCO 薄膜制备了超导超材料，展示了超导超材料的可调谐特性。该超材料工作在 X 波段，由超导波导、超导线和开口环谐振器组成。通过改变温度、直流磁场和射频磁场，都可以实现超材料电磁响应的调谐。

2010 年，美国俄克拉荷马州立大学张伟力课题组[35]采用 YBCO 薄膜，研制了高温超导太赫兹超材料。当温度降至转变温度以下时，超材料的透射峰峰值发生了显著变化。同年，美国洛斯阿拉莫斯实验室陈侯通课题组[36]研究了 YBCO 太赫兹超材料的谐振频率调谐特性。通过改变温度，观察到超材料的谐振频率发生了明显的偏移。基于实验测量得到了超导薄膜复电导率，并通过数值计算复现了频率调谐的特征，从而证明频率调谐特性是由超导薄膜温度依赖的动态电感引起的。2011 年南京大学超导电子学研究所[37]采用 NbN 薄膜制备了具有电谐振结构的超导超材料。实验结果显示，当谐振频率接近能隙频率时，频率调谐范围可以达到 30%。

1.2.2 电调控超导超材料

超导材料无阻载流的能力是有限的，当电流值超过某一特定值(临界电流) 后，超导材料电导率会发生突变。此外，由于存在电极接触电阻和金属引线电阻，即使电流低于超导临界电流，也会由于欧姆损耗导致超导薄膜的温度发生变化，从而改变超导超材料的调制特性。

2012 年，英国南安普顿大学 Zheludev 课题组[38]实现了超导超材料的电流调制。他们采用 Nb 膜制备了毫米波段的超导超材料，当施加控制电流时，由于电流产生的磁场和热效应，引起传输谱发生改变。该超材料的调制深度达 45%，调制频率达到 100 kHz。2017 年，南京大学超导电子学研究所[39]开发了一种基于超导超材料的太赫兹电调制器，实现了太赫兹波的动态调控。在正弦电信号的控制下，该器件最高可以实现约 1 MHz 的调制速度。

1.2.3 光调控超导超材料

当对超导超材料施加近红外光和可见光泵浦

时，由于光子能量远高于超导能隙，光子吸收导致库珀对被拆散并产生准粒子，从而导致超导材料失去超导电性。因此，通过光泵浦可以实现超导超材料电磁响应的调控。

2012 年，美国洛斯阿拉莫斯实验室陈侯通课题组[26]研究了高温超导超材料在近红外飞秒激光下的超快调谐特性。如图 2 所示，增加光泵浦功率会导致传输信号的明显变化，对应的透射谱中谐振幅度降低和频率红移同时也会带来显著的热效应和较长的弛豫时间。2018 年，新加坡南洋理工大学 Singh 课题组[40]利用光泵浦导致的超导超材料传输特性超快转变，实现了双通道的光学开关。

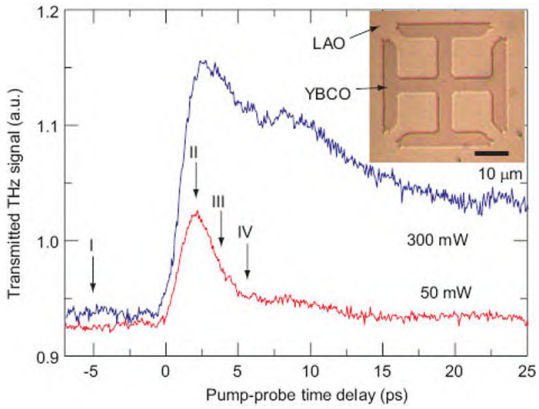

图 2 YBCO 超导超材料在近红外飞秒激光激发下的传输信号的超快转变[26]

Fig. 2 Ultrafast dynamics of terahertz transmission signal of YBCO superconducting metamaterial excited by near-infrared femtosecondlaser[26]

1.2.4 磁场调控超导超材料

超导材料在超导状态下具有完全的抗磁性，但当磁场超过某一特定值后，会失去超导电性回到正常态。2010 年，南京大学超导电子学研究所与德国伍兹堡大学合作，采用连续波太赫兹光谱系统研究了基于超导 Nb 膜的太赫兹超材料[25]。测试结果表明，在超导转变温度以下时，超导超材料具有较低的损耗。通过改变施加的磁场强度，可以实现太赫兹传输谱的调谐。

1.3 非线性超导超材料

虽然太赫兹光子的能量小于超导能隙，但在强场太赫兹脉冲的激励下，可以激发超导薄膜的非线性效应。例如，在 1 THz 频率和 30 kV/cm 电场下，太赫兹脉冲的有质动力能为 10 meV，高于 NbN 的能隙(5.2 meV)，因此强场太赫兹脉冲可以拆散库珀对。2012 年，日本东京大学 Shimano 课题组[41]研究了 NbN 薄膜在强太赫兹电场下的传输特性，随着场强的增加，NbN 薄膜的电导率发生显著变化。2014 年，该课题组使用窄带强太赫兹脉冲，在 24 nm 厚的 NbN 薄膜上激发出三次谐波，超导薄膜在太赫兹强场作用下表现出了非线性效应[42]。

2013 年，南京大学超导电子学研究所与日本大阪大学 Tonouchi 课题组合作，研究了超导超材料在强场太赫兹脉冲激励下的非线性效应[43]。由于入射太赫兹场强改变了超导薄膜的电导率，从而引起透射谱发生改变。通过改变太赫兹电场的场强，超材料的太赫兹传输谱具有明显的非线性效应。同年，美国洛斯阿拉莫斯实验室 Grady 等人[44]报道了高温超导 YBCO 超材料的非线性太赫兹响应。如图 3 所示，随着入射太赫兹场强的增大，透射谱的谐振幅度急剧下降，谐振频率发生偏移。太赫兹泵浦-太赫兹探测系统的测试结果展示了太赫兹透射谱在几皮秒时间内的动态变化过程。

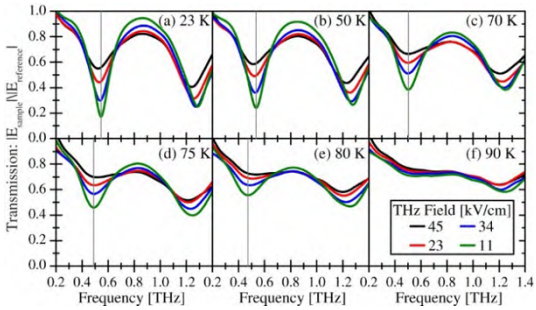

图 3 太赫兹脉冲的电场强度对不同温度下 YBCO 超导超材料的传输谱的影响[44]

Fig. 3 Effect of electric field strength of terahertz pulse on transmission spectra of YBCO superconducting metamaterials at different temperatures[44]

2016 年，英国南安普顿大学 Zheludev 课题组[45]报道了一种工作在毫米波频段的非线性超导超材料，三阶非线性系数高达 10 cm^2/W，弛豫时间为 25 μs。他们在超材料单元中引入纳米桥区，入射电磁波对纳米结构加热导致了传输谱发生非线性变化。非线性超材料在开关、路由、检测等领域都有良好的应用前景。

2　超导等离激元器件

表面等离激元是指在电磁场的驱动下，束缚在导体和电介质界面上的电子的集体振荡。表面等离激元可以将电磁波能量限制在亚波长尺度，并具有很强的局域场增强特性。基于等离激元的器件和电路在信号调控和传输、高灵敏度生物传感等方面展现了良好的应用前景[46]。在光学频段，金属材料由于介电常数的实部为负数且绝对值远大于介电常数虚部，可以作为良好的等离子体媒质。在太赫兹和微波频段，金属的电磁响应可以近似为理想导体，不支持等离激元的激发，因此近年来科研人员一直在寻找太赫兹波段更适合的等离激元材料。

在太赫兹及更低频段，超导体具有负的介电常数，并具有显著的动态电感效应，因此可以视为等离子体媒质。在微观机制上，由于超导电子对可以几乎无损耗地通过晶格，入射光子的能量可以转化为超导电子对的动能储存下来。因此，超导材料可以支持等离激元的激发。在能隙频率以上，入射的光子拆散超导电子对，导致材料损耗增大，使得超导材料不再满足等离子体媒质的要求。超导材料已经被用于毫米波和太赫兹等离激元器件的研究中。另外，在层状高温超导体铜氧化物中，由于超导层间的约瑟夫森耦合导致约瑟夫森等离激元的激发。利用约瑟夫森等离激元的独特性质，可以开发新型的电磁调控器件。

2.1　超导等离激元器件

由于超导体是等离子体媒质且具有极低的损耗，超导等离激元器件也具有温度、电流、磁场和瞬态电场的调谐特性。因此，超导材料是开发低损耗、可调谐的太赫兹等离激元器件的优异材料[47]。在超导薄膜亚波长小孔阵列中，由于表面等离激元的激发，在太赫兹透射谱中会出现透射增强现象。此外，超导材料还可以用来制作低损耗的太赫兹等离激元波导。

2010 年，科研人员研究了高温超导薄膜亚波长小孔阵列的透射谱，在毫米波和太赫兹频段观察到了透射增强的现象[48-49]。美国俄克拉何马州立大学的张伟力课题组[48]通过太赫兹时域光谱测试，证明高温超导薄膜的周期性亚波长小孔阵列中存在表面等离激元激发引起的异常透射现象，并证实了透射强度随温度而变化。南安普顿大学 Zheludev 课题组[49]报道了毫米波频段高温超导亚波长小孔阵列的异常透射现象。实验结果表明，毫米波传输系数对温度的依赖性是由材料的电导率发生变化引起的。在正常态，超导材料可以视为有耗金属，传输系数较低。当样品进入超导态并接近超导转变温度时，超导材料可以支持等离激元的激发，此时样品具有最大的传输系数。当温度进一步降低时，材料可以被认为是理想导体，这时传输系数略有下降。

2011 年，南京大学超导电子学研究所[50]报道了超导 NbN 薄膜亚波长小孔阵列的异常透射现象。在太赫兹频段，由于超导材料的低损耗和表面等离激元的激发，超导状态下透射峰有显著的增强。实验还观察到透射峰的谐振频率随温度变化会发生偏移，这主要取决于超导薄膜动态电感的变化以及表面等离激元和局域等离激元的耦合作用。2014 年，该课题组与日本大阪大学 Tonouchi 课题组合作，利用强场太赫兹脉冲对超导 NbN 薄膜亚波长小孔阵列的传输特性进行了研究[51]。在太赫兹场强较强的情况下，传输谱具有显著的非线性效应。此外，利用太赫兹泵浦-太赫兹探测光谱测量了探测脉冲的时间演化，在太赫兹脉冲电场泵浦后，透射谱的切换时间小于 5 ps。

太赫兹波和超导等离激元结构之间具体如何相互作用的研究，对于研究阐明异常透射现象的物理机制具有重要意义。南京大学超导电子学研究所与南开大学刘海涛课题组合作，测试出一系列超导亚波长小孔阵列的太赫兹增强透射现象，并采用微观复合表面波模型进行了理论分析，阐明了异常透射的微观物理机制[52]。如图 4 所示，理论计算的太赫兹传输谱和实验结果相吻合。理论分析表明: 当小孔宽度远低于波长时，透射增强主要是由小孔周围的局部共振引起的; 当小孔较大时，由小孔阵列散射的表面波占据主导地位; 当温度接近临界温度，工作频率接近能隙频率时，表面等离激元的激发效率显著提高。

2011 年，台湾彰化师范大学 Lee 等人[53]通过数值计算研究了周期性超导光栅的透射特性。在计算得到的透射谱中观察到透射强度接近 100% 的透射峰，这可以归因于超导光栅和真空区域界面上的表面等离激元的激发。当圆形超导带条的直径接近光栅的周期时，可以维持多个表面等离激元协助的传输共振。透射峰值和光栅的截止频率都展现了明显

的温度依赖关系。

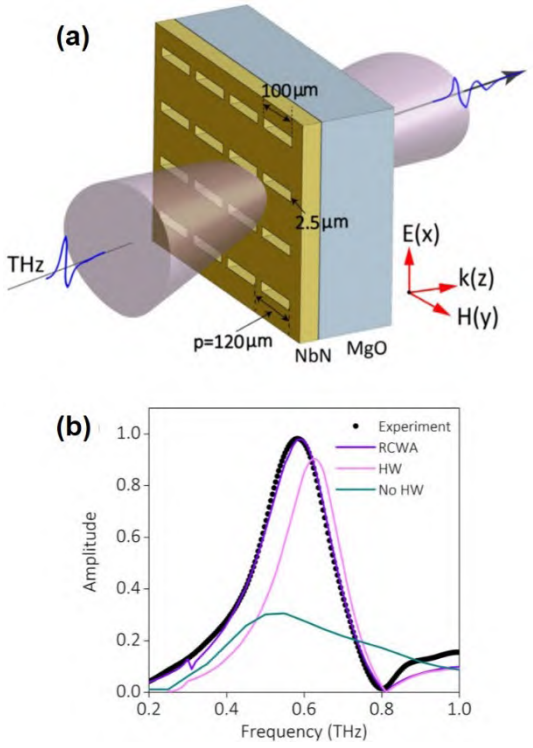

图 4 (a) 超导 NbN 亚波长小孔阵列和太赫兹光谱示意图; (b) 样品在超导态下的太赫兹透射谱实验结果和计算结果[53]

Fig. 4 (a) Schematic diagram of superconducting NbN subwavelength hole array and the terahertz spectra; (b) Experimental and calculated terahertz transmission spectrum of the sample in the superconducting state [53]

2.2 约瑟夫森等离激元器件

铜氧化物高温超导体大多具有层状结构,超导层之间通过约瑟夫森效应相互耦合。1992 年 Kleiner 等人在 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ 单晶中首次观测到这种约瑟夫森效应,它也被称为本征约瑟夫森效应。在层状结构超导体中,存在于超导体层间的电磁波模式被称为约瑟夫森等离激元,其谐振频率在太赫兹频段。由于绝缘层的隔离,超导层中的正常态电子不能在垂直于超导层的方向上发生集体振荡,因此,约瑟夫森等离激元响应来源于层间隧穿的超导电子对的贡献。由于约瑟夫森隧道电流(j)与层间相位(φ)满足非线性关系 $j \propto \sin\varphi$,所以约瑟夫森等离激元具有很强的非线性效应,非常适合开发非线性器件。理论预言,非线性的约瑟夫森等离激元在约瑟夫森等离子体频率以下也可以传播,并会展现出自会聚、慢光等非线性效应[54]。

同表面等离激元类似,表面约瑟夫森等离激元也可以在层状超导体和电介质的界面上传播。由于波矢的不匹配,自由空间入射的电磁波不能直接激发表面约瑟夫森等离激元。采用原子力显微镜探针激发、全内反射(total internal reflection)和周期性空间调制等方法,可以使入射电磁波获得额外的波矢量,从而激发表面约瑟夫森等离激元[55]。

通过人工设计的亚波长结构对电磁波的散射为表面等离子波提供纵向电场,可以激发约瑟夫森等离子谐振。2019 年,加州大学圣地亚哥分校 Schalch 等人[56]将制备在柔性衬底上的开口谐振环阵列贴在高温超导 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ 单晶上,观察到了开口谐振环的谐振模式与约瑟夫森等离激元谐振之间的强耦合作用。在测量得到的太赫兹反射谱中,观察到由于强耦合而引起的免交叉现象,拉比频率达到 0.29。

2021 年,南开大学季鲁课题组和南京大学超导电子学研究所合作,基于高质量 $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$(Tl-2212)薄膜开发了一种高温超导太赫兹超材料[57]。在 Tl-2212 高温超导超材料的太赫兹透射谱中,观察到约瑟夫森等离激元谐振的光谱响应,且谐振频率随温度而变化,仿真结果表明亚波长谐振器的散射可以为谐振激励提供 z 轴电场分量。此外,在实验中还测量了 Tl-2212 薄膜的太赫兹透射谱,超材料中约瑟夫森等离激元谐振频率的温度依赖性与纯膜的实验结果一致。这一结果证明了超材料为激发约瑟夫森等离激元提供了新的路径。

3 超导量子超材料

超导体具有宏观的量子效应。单结超导环,即射频超导量子干涉仪(RF-SQUID),由超导环和约瑟夫森结串联组成。单结超导环和超材料的基本单元-开口谐振环,在结构上有很多相似之处。RF-SQUID 是一个宏观的具有多个能级的量子系统,它具有磁通量子化和量子干涉等效应。若将 RF-SQUID 组成周期性阵列,可以实现超导超材料。清华大学的杜春光等人的理论工作表明,由 SQUID 构成的超材料可以产生一些新的电磁现象,如量子电磁感应透明(electromagnetically induced transparency,简称 EIT)现象、量子相干效应、磁场诱导的非线

性效应等[58]。

2013 年，美国马里兰大学 Trepanier 等人[30]设计制备了 27×27 个 RF-SQUID 阵列构成的超导超材料，并在实验中证实了它在磁场、射频电流和温度下具有良好的调谐特性。利用 SQUID 对磁场的敏感特性，实现了谐振频率在磁场下具有高达 80 THz/G 的调谐率。此外，在中等激励功率下，观测到 EIT 现象。2014 年，德国卡尔斯鲁厄理工学院 Ustinov 课题组[59]制备了一种由 54 个 SQUID 一维阵列组成的超导超材料。实验结果表明这种超导超材料具有多稳态，在中等功率范围，它们可以在不同状态之间切换，这些状态对应不同的磁导率。通过施加纳秒长度的微波脉冲，可以实现超材料传输状态的切换。

基于超导约瑟夫森结可以构建量子的二能级系统，即量子比特。超导量子比特被广泛应用于量子计算机的研究中，有望在未来为人类提供无与伦比的计算能力[60]。超导量子比特可以看作人工原子，这些人工原子组成的阵列就构成了超导量子超材料。通过微波脉冲控制人工原子的能级跃迁，可以实现量子超材料电磁响应的调控。基于量子电动力学的研究，当多个相同的量子比特与电磁场发生相互作用时，会产生很多有趣的现象。当 N 个相同的量子比特与谐振腔发生集体耦合时，会呈现 $N^{1/2}$ 倍的耦合增强。

2014 年，德国卡尔斯鲁厄理工学院 Ustinov 课题组[61]首次在实验中实现了超导量子超材料。如图 5 所示的量子超材料中，包含了 20 个超导磁通量子比特，并嵌入到微波谐振器中。在实验中，观察到由于八个量子比特的集体谐振耦合作用，导致谐振器的谐振频率发生了色散偏移。尽管超导量子超材料取得了一定的突破，但是仍然面临巨大的技术挑战，量子超材料中人工原子能级间隔的不一致性是限制其发展的主要难题。

4　抗磁性超导超材料

超导体具有迈斯纳效应，即完全抗磁性。当磁场强度低于临界值时，超导体内部的磁场为零。利用超导材料的抗磁性可以实现磁屏蔽，但是这会导致外加磁力线发生扭曲，从而导致物体被探测到。2007 年，英国帝国理工学院的 Wood 和 Pendry[62]理论上提出采用超导超材料实现直流磁场下的隐身。

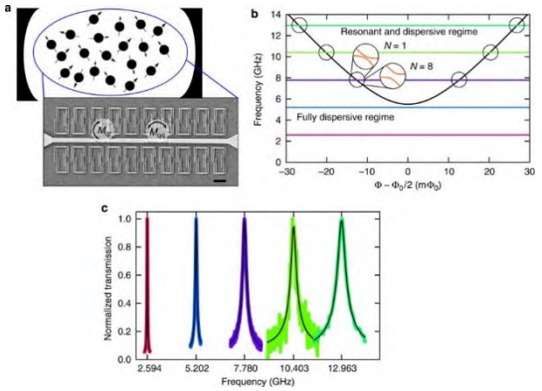

图 5　(a) 超导谐振腔中 20 个超导量子比特构成的量子超材料的电子显微镜图片; (b) 量子比特和谐振器组成的系统的能级结构; (c) 谐振器在基模和前四次谐波处的透射系数[61]

Fig. 5 (a) Electron microscopic image of a quantum metamaterial consisting of 20 superconducting qubits in a superconducting resonator; (b) Energy level structure of the system consisting of qubits and resonators; (c) Transmission coefficients of the resonator at the fundamental mode and the first four harmonics [61]

由于超导材料在低频下具有抗磁性，将其与具有顺磁性的材料组合在一起，可以获得可变、各向异性的磁导率，从而实现磁场隐身现象。2008 年，Magnus 等人[63]在实验上实现了具有直流磁响应的超导超材料。他们将超导材料分成小的超导平板结构，利用超导材料的抗磁性来实现磁响应的调控。当磁场方向与平板平行时，超导超材料抗磁性可以忽略不计。当施加垂直方向的磁场时，则具有很强的抗磁响应。通过改变平板尺寸与单元间距的比值，可以实现超导超材料抗磁性的调节。

2012 年，美国哈佛大学的 Narayana 等人[64]在实验上实现了直流磁场下的隐身。他们采用超导和软铁磁材料组成的人工结构材料，构造了磁场的隐身斗篷。测试结果表明，当外加直流磁场时，超材料内部的磁场完全屏蔽，而外部磁场保持不变。2012 年，Gömöry 等人[65]采用了更为简单的结构在实验上实现了直流磁场下的隐身。超材料包含了两个共轴的圆柱体，内部为多层超导带材，外部为反铁磁材料。实验结果证明这种铁磁和超导材料的复合超材料可以实现直流的磁场隐身。

超导环内部的磁通量是量子化的，它只能是磁通量量子 $\Phi_0 = h/2e$ 的整数倍。磁场量子化反映了超导体具有宏观量子效应。超导环外加磁场后，超

导环中会产生屏蔽电流以补偿磁通的变化，从而满足磁通量子化条件。利用这种效应，英国南安普顿大学 Savinov 等人[66]提出了如图 6 所示的磁通排斥超导超材料。这种超导超材料由高温超导薄膜制成，并采用了木刻结构。通过实验证明，当超材料从磁通排斥态进入到磁通穿透态时，传输谱会发生显著的变化。由于条件的限制，在实验中尚未观察到由于磁通量子化引起的非线性电磁响应。基于磁通量子化的超导超材料仍有待进一步研究。

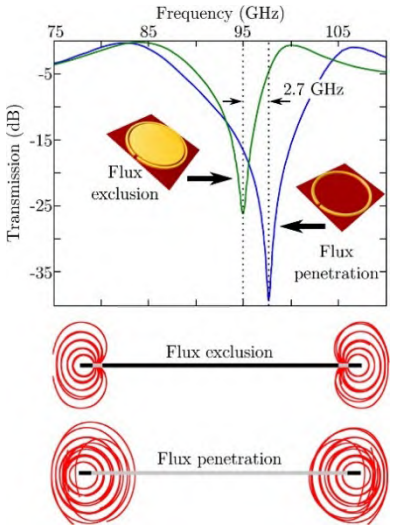

图 6 磁通排斥超导超材料[66]

Fig. 6 Flux exclusion superconducting metamaterial[66]

5 超导超材料的应用

超导超材料在科学研究和工程中有很多应用。近年来，利用超材料这种经典系统去模拟凝聚态系统中的量子现象和原子系统中量子光学现象引起了科研人员的广泛兴趣。超导超材料由于具有极低的损耗和良好的调谐特性，也被广泛用于模拟多种量子现象，如 EIT、宇称-时间(parity-time，简称 PT)对称性相变等。利用超导超材料的高 Q 值，也可以用于实现光与物质的强耦合作用。另外，超导材料被广泛用于制备高灵敏的探测器，将超导超材料与探测器相结合，可以构造新型超导探测器。

5.1 超导超材料模拟量子现象

EIT 效应是存在于三能级原子系统中的一种量子干涉效应，使得原本不透明的介质上出现了窄带的透明窗口。近年来，超材料等经典系统也用来模拟 EIT 效应。具有类 EIT 响应的超材料在透明窗口附近有剧烈的色散，并具有显著的慢光效果，在光存储、通信、生物传感等领域展现了良好的应用前景。超材料的损耗是限制慢光效果的关键因素。此外，具有可调 EIT 响应的超材料为电磁波的调控提供了一条有效路径。因此，具有低损耗和可调谐特性的超导材料非常适合开发具有类 EIT 响应的超材料。

2011 年，美国马里兰大学 Kurter 等人[67]制作了微波段的金属-超导复合超材料，实现了可调谐的类 EIT 效应。利用低损耗的超导谐振器与高损耗的金属谐振器之间的弱耦合作用，获得了具有剧烈色散的透明窗口和高达 0.3 的群延迟-带宽积。

2011 年，南京大学超导电子学研究所[68]采用超导 NbN 薄膜设计制备了平面太赫兹超材料，实现了 EIT 效应的模拟。在超导状态下，由于耦合增强和损耗减小，在透明窗口实现了高透射率和大的群延迟-带宽积。此外，通过两个谐振频率不同的暗谐振器与明谐振器耦合，实现了具有两个慢光窗口的类 EIT 效应。利用超导薄膜的电导率随温度会发生变化，实现了类 EIT 响应的频谱调谐。2013 年，该课题组对全超导超材料和超导-金属复合超材料的 EIT 响应进行了比较[69]。由于全超导超材料单元内两个谐振器极低的欧姆损耗和强相互耦合作用，与复合超材料相比具有更好的慢光效果。近年来，该课题组在具有 Fano 谐振和环形偶极子谐振的超导超材料也观察到了温度调谐的慢光效应[70]。通过施加电流，可以改变超导谐振器的损耗特性，从而实现 EIT 响应的电调控[71]。

PT 对称哈密顿量描述了一类服从宇称变换和时间反演变换下的对称性要求的非厄米量子系统。由异常点分隔的自发 PT 对称性破缺现象已经在多种光学系统的实验中得到证明。超材料也被广泛用于 PT 对称性的研究中。为了能够连续地通过异常点实现 PT 相变的动态过渡，可以在 PT 对称超材料中引入超导材料。2017 年，天津大学韩家广课题组与南京大学超导电子学研究所合作，通过实验在金属-超导复合超表面上观察到了 PT 对称性相变的动态过程[72]。超表面单元由金属谐振器和超导 NbN 谐振器组成，且存在一定的耦合作用。超导薄膜电导率随着温度的变化，超导谐振器的参数也发生改变，从而导致 PT 对称相变的产生。超导超材料为研究 PT 对称性相变提供了一种可行的方法。

5.2　超导超材料用于增强光和物质的相互作用

谐振腔中光与物质相互作用是量子光学的核心，也是多种量子技术，如激光器、量子计算机的核心。在微波和太赫兹波段，利用超导谐振器的低损耗特性，有助于观测和调控光与物质耦合产生的极化激元。超导超材料由于具有较高的 Q 值，可以用于光与物质的相互作用研究。在太赫兹频段，超表面与二维电子气中的回旋共振的强耦合作用受到了广泛的关注。超导超表面在太赫兹频段具有极低的损耗，非常适合太赫兹波与物质相互作用的研究。

2014 年，瑞士苏黎世联邦理工学院的 Scalari 等人[73] 采用超导 Nb 膜在 GaAs 二维电子气上制备了超导超表面，观察到了如图 7 所示的强耦合作用。随着磁场强度的增加，二维电子气中的回旋共振频率逐渐升高，即朗道能级的间隔逐渐增加。由于超导超表面与朗道能级跃迁的超强耦合作用，当超导谐振器的谐振频率接近朗道能级频率时，会出现免交叉现象，归一化耦合系数达到 0.27。基于有限元模型的仿真结果与实验数据相互吻合。2018 年，该课题组又采用 YBCO 薄膜制备了太赫兹超表面，并开发两种技术将超表面器件贴近含有二维电子气的异质结，最终实现了超导超表面与回旋跃迁的超强耦合作用[74]。

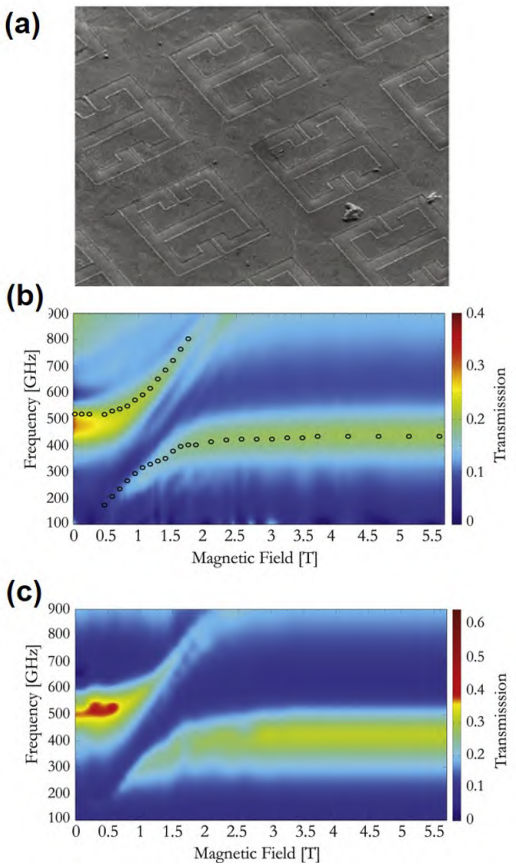

图 7　(a) 在二维电子气上制备的超导 Nb 超表面的样品的电子显微镜图片; 二维电子气上超导超表面随磁场变化的传输谱的测试结果(b) 和仿真结果(c) [73]

Fig. 7 (a) Electron microscopic image of superconducting Nb, metasurface fabricated on a two-dimensional electron gas. Experimental (b) and simulated (c) terahertz transmission spectra of the superconducting metasurface on two-dimensional electron gas as a function of magnetic field [73]

5.3　基于超材料的超导探测器

超导材料非常适合制作高灵敏的超导探测器。通常探测器需要额外的接收天线，用于捕获和聚集电磁波。基于超导超材料可以实现能量收集装置与检测单元集成的超导探测器。2013 年，南安普顿大学 Zheludev 课题组[75] 基于超导超材料，开发了一种新型毫米波超导探测器。该探测器包含一个二维阵列且相互连接的超材料谐振器，利用激发集体模式收集入射波，并将入射波的热量导入到热点上。利用热点温度变化引起的电阻变化，实现电磁辐射的检测。这种探测器可以将辐射能量收集、频谱选择和检测功能集成在一起。尽管该探测器与超导转变边缘结相比在灵敏度等方面尚存在较大的差距，但是为大规模超导成像阵列的开发提供了新的思路。

6　总结

超导材料由于其独特的优势在超材料的研究和应用中发挥了巨大的作用。低损耗的超导超材料可以用于开发高 Q 值的太赫兹超材料，并可以用于增强太赫兹波与物质的相互作用。超导超材料的调谐特性可以用于实现电磁波的主动调控。超导材料非常适合毫米波和太赫兹频段等离激元器件的开发。利用超导材料的抗磁性和宏观量子效应可以开发新型的超材料。超导超材料也有其自身的缺点，比如受制于低温条件、需要高质量的薄膜和器件制备工艺，这制约了超导超材料的进一步发展和应用。随着制备工艺和低温技术的进一步发展，未来超导超材料有着更广阔的发展空间。

在超导超材料的研究中，还有很多问题值得进一步的探索和研究。第一，非线性和时变超导超材

料的开发。基于约瑟夫森效应的超导超材料具有很强的非线性效应,可以用于开发新型的非线性器件。在强场太赫兹脉冲或光脉冲的激励下,超导态的切换时间在皮秒量级,非常适合开发具有时变特性的超材料。在此基础上,有望开发出具有非互易、频率转换等特性的新型电磁器件。第二,量子超材料是目前量子技术的热点问题。量子超材料相比传统超材料有很多不可比拟的优势,并在量子计算和量子信息领域有望发挥巨大的作用。第三,面向应用的超导超材料系统开发。超导器件在量子计算、太赫兹天文等领域发挥了不可替代的作用。在这些应用中,超导超材料具有多自由度的电磁波调控能力和紧凑的体积,在提高系统性能、集成度等方面有较大的潜力。

参考文献:

[1] ZheludevN I. The Road Ahead for Metamaterials [J]. Science, 2010, 328(5978): 582-583.

[2] Liu Y M, Zhang X. Metamaterials: a new frontier of science and technology [J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(5): 2494-2507.

[3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al.Metamaterial Electromagnetic Cloak [J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.

[4] Li G X, Kang M, Chen S, et al. Spin-enabled plasmonic metasurfaces for manipulating orbital angular momentum of light [J]. Nano Letters, 2013, 13(9): 4148-4151.

[5] Chen X Z, Huang L L, Mu hlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. Nature Communications, 2012, 3: 1198.

[6] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: Versatile multifunctional photonic components [J]. Science, 2017, 358(6367): 1-8.

[7] Heimbeck M S, Everitt H O. Terahertz digital holographic imaging [J]. Advances in Optics and Photonics, 2020, 12(1): 1-59.

[8] Zheng G, Muhlenbernd H, Kenney M,et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.

[9] Zhang C H, Zhou G C, Wu J B, et al. Active Control of Terahertz Waves Using Vanadium - Dioxide - Embedded Metamaterials [J]. Physical Review Applied, 2019, 11(5): 054016 .

[10] Hashemi M R, Cakmakyapan S, Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation [J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(5): 094501.

[11] Zhang L,Chen X Q, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. Nature Communications, 2018, 9: 4334.

[12] Li L L, Cui T J, Liu S, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. Nature Communications, 2017, 8: 197.

[13] Shadrivov I V, Kozyrev A B, van der Weide D W, et al. Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(6): 161903.

[14] Lapine M, Shadrivov I V, Kivshar Y S. Colloquium: Nonlinear metamaterials [J]. Reviews of Modern Physics, 2014, 86(3): 1093-1123.

[15] Driscoll T, Kim H-T, Chae B-G, et al. Memory Metamaterials [J]. Science, 2009, 325(5947): 1518-1521.

[16] Goldflam M D, Driscoll T, Chapleret B, et al. Reconfigurable gradient index using VO2 memory metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(4): 044103.

[17] Wilson M N. 100 Years of Superconductivity and 50 Years of Superconducting Magnets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 3800212.

[18] Reddy D V, Nerem R R, Nam S W, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors with 98% system detection efficiency at 1550 nm [J]. Optica, 2020, 7(12): 1649-1653.

[19] Javadi-Abhari A,Gokhale P, Holmes A, et al. Optimized surface code communication in superconducting quantum computers [J]. 50th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2017: 692-705.

[20] Iwasa Y, Marken K R. Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues [J]. Physics Today, 1995, 48(10): 68.

[21] Tominari Y, Kiwa T, Murakami H, et al. Resonant terahertz radiation from $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8+\delta}$ thin films by ultrafast optical pulse excitation [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(17): 3147-3149.

[22] Yao C, Ma Y. Recent breakthrough development in iron-based superconducting wires for practical applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2019, 32: 023002.

[23] Strasik M,Hull J R, Mittleideret J A, et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings [J]. Superconductor Science and Technology, 2010, 23: 034021.

[24] Ricci M, Orloff N, Anlage S M. Superconducting metama-

terials [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(3): 034102.

[25] Jin B B, Zhang C H, Engelbrecht S, et al. Low loss and magnetic field-tunable superconducting terahertz metamaterial [J]. Optical Express, 2010, 18(16): 17504-17509.

[26] Singh R, Xiong J K, Azad A, et al. Optical tuning and ultrafast dynamics of high-temperature superconducting terahertz metamaterials [J]. Nanophotonics, 2012, 1(1): 117-123.

[27] Fedotov V A, Tsiatmas A, Shi J H, et al. Temperature control of Fano resonances and transmission in superconducting metamaterials [J]. Optical Express, 2010, 18(9): 9105-9109.

[28] Kalhor S, Ghanaatshoar M, Kashiwagi T, et al. Thermal Tuning of High-T_c Superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Terahertz Metamaterial [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1400308.

[29] Golovchanskiy I A, Abramov N N, Stolyarov V S, et al. Ferromagnet/Superconductor Hybrid Magnonic Metamaterials [J]. Advanced Science, 2019, 6: 1900435.

[30] Trepanier M, Zhang D, Mukhanov O, et al. Realization and Modeling of Metamaterials Made of rf Superconducting Quantum-Interference Devices [J]. Physical Review X, 2013, 3(4): 041029.

[31] Kurter C, Zhuravel A P, Abrahams J, et al, Superconducting RF Metamaterials Made With Magnetically Active Planar Spirals [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 709-712.

[32] ZhangC H, Wu J B, Jin B B, et al. Low-loss terahertz metamaterial from superconducting niobium nitride films [J]. Optical Express, 2012, 21(1): 42-47.

[33] Srivastava Y K, Manjappa M, Krishnamoorthy H N S, et al. Accessing the High-QDark Plasmonic Fano Resonances in Superconductor Metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(11): 1875-1881.

[34] Ricci MC, Xu H, Prozorov R, Zhuravel A P, et al. Tunability of Superconducting Metamaterials [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 918-921.

[35] Gu J Q, Singh R, Tian Z, et al. Terahertz superconductor metamaterial [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(7): 071022.

[36] Chen H-T, Yan H, Singh R, et al. Tuning the Resonance in High-Temperature Superconducting Terahertz Metamaterials [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(24): 247402.

[37] Wu J B, Jin B B, Xue Y H, et al. Tuning of superconducting niobium nitride terahertz metamaterials [J]. Optical Express, 2011, 19(13): 2021-2026.

[38] Savinov V, Fedotov V A, Anlage S M, et al. Modulating Sub-THz Radiation with Current in Superconducting Metamaterial [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(24): 243904.

[39] Li C, Wu J B, Jiang S L, et al. Electrical dynamic modulation of THz radiation based on superconducting metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(9): 092601.

[40] Srivastava Y K, Manjappa M, Cong L Q, et al. A Superconducting Dual-Channel Photonic Switch [J]. Advanced Materials, 2018, 30(29): 1801257.

[41] Matsunaga R, Shimano R. Nonequilibrium BCS State Dynamics Induced by Intense Terahertz Pulses in a Superconducting NbN Film [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(18): 187002.

[42] Matsunaga R, Tsuji N, Fujita H, et al. Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor [J]. Science, 2014, 345(6201): 1145-1149.

[43] Zhang C H, Jin B B, Han J G, et al. Terahertz nonlinear superconducting metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(8): 081121.

[44] Grady N K, Jr B J P, Hwang H Y. Nonlinear high-temperature superconducting terahertz metamaterials [J]. New Journal of Physics, 2013, 15: 105016.

[45] Savinov V, Delfanazari K, Fedotov V A, et al. Giant nonlinearity in a superconducting sub-terahertz metamaterial [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(10): 101107.

[46] Barnes L B, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424: 824-830.

[47] Tsiatmas, Fedotov V A, AbajoF J G D, et al. Low-loss terahertz superconducting plasmonics [J]. New Journal of Physics, 2012, 14: 115006.

[48] Tian Z, Singh R, Han J G, et al. Terahertz superconducting plasmonic hole array [J]. Optics letters, 2010, 35(21): 3586-3588.

[49] Tsiatmas A, Buckingham A R, Fedotovet V A, et al. Superconducting plasmonics and extraordinary transmission [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(11): 111106.

[50] Wu J B, Dai H, Wang H, et al. Extraordinary terahertz transmission in superconducting subwavelength hole array [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1101.

[51] Wu J B, Zhang C H, Liang L J, et al. Nonlinear terahertz

superconducting plasmonics [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(16): 162602.

[52] Wu J B, Zhang X, Jin B B, et al. The dynamic process and microscopic mechanism of extraordinary terahertz transmission through perforated superconducting films [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15588.

[53] Lee H-M, Shyu J-H, Horng L,et al. Surface plasmon polaritons assisted transmission in periodic superconducting grating [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2011, 29(4): 04D105.

[54] Savel'ev S, Rakhmanov A L, Yampol'skii V A, et al. Analogues of nonlinear optics using terahertz Josephson plasma waves in layered superconductors [J]. Nature Physics, 2006, 2(8): 521-525.

[55] Laplace Y, Cavalleri A. Josephson plasmonics in layered superconductors [J]. Advances in Physics: X, 2016, 1(3): 387-411.

[56] Schalch J S, Post K, Duan G W, et al. Strong Metasurface-Josephson Plasma Resonance Coupling in Superconducting $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(21): 1900712.

[57] Guo R,Duan S Y, He Z, et al. Josephson Plasmon Resonance in $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ High-Temperature Superconductor Tunable Terahertz Metamaterials [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(52): 2106891.

[58] Du C, Chen H, Li S. Quantum left-handed metamaterial from superconducting quantum-interference devices [J]. Physical Review B, 2006, 74(11): 113105.

[59] Jung P, Butz S, Marthaler M, et al. Multistability and switching in a superconducting metamaterial [J]. Nature Communications, 2014, 5: 3730.

[60] Clarke J, WilhelmF K. Superconducting quantum bits [J]. Nature, 2008, 453: 1031-1042.

[61] Ustinov A V. Experiments With Tunable Superconducting Metamaterials [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 5(1): 22-26.

[62] Wood B, Pendry J B. Metamaterials at zero frequency [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2007, 19(7): 076208.

[63] Magnus F,Wood B, Moore J. et al. A d.c. magnetic metamaterial [J]. Nature Materials, 2008, 7(4): 295-297.

[64] Narayana S, Sato Y. DC magnetic cloak [J]. Advanced Materials, 2012, 24(1): 71-74.

[65] Gömöry F, Solovyov M, Šouc J, et al. Experimental Realization of a Magnetic Cloak [J]. Science, 2012, 335(6075): 1466-1468.

[66] Savinov V, Tsiatmas A, Buckingham A A, et al. Flux Exclusion Superconducting Quantum Metamaterial: Towards Quantum-level Switching [J]. Science Reports, 2012, 2(1): 1-5.

[67] Kurter C,Tassin P, Zhang L, et al. Classical Analogue of Electromagnetically Induced Transparency with a Metal-Superconductor Hybrid Metamaterial [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(4): 043901.

[68] Wu J B, Jin B B, Wang J, et al. Superconducting terahertz metamaterials mimicking electromagnetically induced transparency [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(16): 161113.

[69] Jin B B, Wu J B, Zhang C H, et al. Enhanced slow light in superconducting electromagnetically induced transparency metamaterials [J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(7): 074004.

[70] Duan S Y, Wu J B, Shen Z, et al. Tunable and high quality factor Fano and toroidal dipole resonances in terahertz superconducting metamaterials [J]. Materials Research Express, 2020, 7(4): 046001.

[71] Li C, Li W L, Duan S Y, et al.Electrically tunable electromagnetically induced transparency in superconducting terahertz metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(5): 052602.

[72] Wang D Y, Li C, Zhang C H, et al. Superconductive PT-symmetry phase transition in metasurfaces [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(2): 021104.

[73] Scalari G, Maissen C, Cibella S, et al. Superconducting complementary metasurfaces for THz ultrastrong light-matter coupling [J]. New Journal Physics, 2014, 16: 033005.

[74] Keller J,Scalari G, Appugliese F, et al. High Tc Superconducting THz Metamaterial for Ultrastrong Coupling in a Magnetic Field [J]. ACS Photonics, 2018, 5: 3977-3983.

[75] Savinov V, Fedotov V A, de Groot P A J, et al. Radiation-harvesting resonant superconducting sub-THz metamaterial bolometer [J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(8): 084001.