

太赫兹超导人工电磁超材料的研究进展

张彩虹, 吴敬波, 金飏兵*

南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 江苏 南京 210093

摘要 太赫兹人工电磁超材料一直存在损耗大、性能不佳和不可灵活调控等问题。超导材料的损耗极低, 是太赫兹波段高性能功能器件的优选材料之一。介绍了太赫兹超导人工电磁超材料的发展, 并详细总结了其低损耗的特性以及灵活调控的方法。结合太赫兹波段高性能功能器件的应用需求, 分析了太赫兹功能器件的发展趋势、存在的问题以及所面临的关键科学问题。

关键词 太赫兹技术; 超材料; 超导材料; 主动调控; 低损耗太赫兹器件

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614005

Research Progress on Terahertz Superconducting Artificial Electromagnetic Metamaterials

Zhang Caihong, Wu Jingbo, Jin Biaobing*

Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract The study of terahertz artificial electromagnetic metamaterials is constantly challenged by the problems of large loss, poor performance, and inflexible control. Superconducting materials exhibiting extremely low losses are among the best materials for high-performance functional devices in terahertz band. As such, this paper introduces terahertz superconducting artificial electromagnetic metamaterials, along with a detailed summary of their functionalities of low loss and flexible control. With respect to the application requirement of high performance, an analysis of the development trend, existing problems, and key scientific issues on terahertz functional devices is provided herein.

Key words terahertz technology; metamaterials; superconducting materials; active control; low loss terahertz devices

OCIS codes 300.6495; 160.3918; 300.6500

1 引言

太赫兹 (THz) 辐射一般是指频率范围为 0.1~10 THz (波长范围为 0.03~3 mm) 的电磁波, 其波谱处在微波和红外辐射之间。太赫兹技术的快速发展和应用, 对太赫兹波段各种器件包括太赫兹源和探测器、太赫兹谐振器、滤波器、太赫兹开关、调制器等的需求日益迫切。但目前一直缺乏大量、天然的太赫兹器件材料, 周期性结构人工电磁超材料的出现为太赫兹波段器件的发展提供了可能^[1-3]。人工电磁超材料是结构单元的人工排列, 它表现出天然

材料所不具有的独特电磁特性, 这些电磁特性可用于控制电磁波传播, 在太赫兹器件、成像、隐身等方面有着较高的应用价值^[4-12]。

在介质基片上加工金属结构单元是产生人工电磁超材料的常用方法, 主要是因为微波段的损耗相对较低, 而且在实验中很容易得到。然而, 随着频率升高到太赫兹波段, 金属材料的欧姆损耗显著增大, 使之前的超材料设计不再具有预期的电磁特性, 因此需要减少太赫兹人工电磁超材料的损耗。所报道的普通金属太赫兹人工电磁超材料的低温结果显示, 其损耗在温度降到 1 K 时可以降低 40%^[13]。而

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-03-27; 录用日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金 (61731010, 61521001, 61671234, 61871212, 61701219)、国家重点研发计划 (2017YFA0700202)、中央高校基本科研业务费专项 (021014380117)

* E-mail: bbjin@nju.edu.cn

超导材料在超导态时的损耗更低,如果用超导薄膜代替普通的金属薄膜来设计太赫兹波段的人工电磁超材料,将是一个获得低损耗的很好选择。另外,除了低损耗以外,超导材料的特性在超导态和正常态时具有显著差异,而且对外在的环境(如温度、电流、电场、磁场等)异常敏感,具有优异的调控特性。利用这些独特性质对加工好的超导太赫兹人工电磁超材料进行主动调控,可以解决目前太赫兹波段器件损耗较大、性能不佳且难以调控的问题。

本文详细回顾了太赫兹波段超导人工电磁超材料的发展,介绍了其低损耗的特性,以及利用多种手段进行的灵活调控,同时结合太赫兹波段高性能功能器件的应用需求,分析了多种太赫兹功能器件的发展、存在问题以及所面临的关键科学问题。

2 超导人工电磁超材料

2.1 超导材料的特性简介

超导电性最早于 1911 年由荷兰物理学家 Onnes 发现,他通过将汞样品冷却到液氮温度(4.2 K),发现电阻突然减小到 0Ω 附近,在此温度下汞就成为超导体^[14]。此后,人们陆续在越来越多的合金、金属以及化合物材料中认识到这种超导现象。超导电性的 3 大主要特征是:1) 直流电阻为 0Ω ,即当温度降低到临界温度以下时,其直流阻抗接近于零;2) 完全的抗磁性(迈斯纳效应),即当一块超导材料完全处于超导态时,原本存在于内部的磁场会被完全排除在超导体外面,而外部磁场在接触超导体表面时则会以指数倍衰减(仅可穿透超导体表面极小范围);3) 宏观量子效应^[15]。不同的材料所对应的超导转变温度(T_c)各有不同,但对于大多数单一金属材料来说,其 T_c 通常小于 23 K,因此这类材料被称为低温超导材料,比如常见的汞(Hg)、铝(Al)、铌(Nb)、氮化铌(NbN)等。1986 年, Bednorz^[16] 等发现钇钡铜氧(YBCO)等高温超导材料的 T_c 可提高到液氮温区 77 K 以上。

超导材料以其独特的性质在科研、军工和生产等领域中得到广泛的运用,随着超导材料的发展,低损耗、易调控的超导材料与人工电磁超材料的有效结合,可以应用于太赫兹主动功能器件的研究和应用中^[17-37]。

2.2 低损耗、可调谐、主动调控太赫兹超导人工电磁超材料

超导材料的一个显著的特性就是在太赫兹波段拥有比金属更低的损耗。在太赫兹波段,一般损耗

小的金属,比如金、银等的电导率主要考虑其实部,其值在 10^7 S/m 量级;而超导薄膜的电导率一般由实部和虚部构成,且虚部起主要作用。与一般金属的电导率主要受自由电子运动的影响不同,超导材料的电导率主要受超导电子对的影响,其运动受阻非常小,这直接决定了超导薄膜拥有比一般金属更小的表面电阻^[19, 22-23],从而决定了超导材料具有更低的损耗和更高的品质因素 Q 。

2005 年, Ricci 等^[17] 利用超导铌设计加工了一种劈裂环谐振器(SRR)与线阵列的复合结构,首先在微波波段实现具有负折射率的超导材料;随后利用温度和磁场证明了超导材料的可调谐性^[18]。此后不久,在太赫兹波段,陆续有科学家利用常见的低温超导薄膜 Nb、NbN,以及高温超导薄膜 YBCO 代替金属薄膜,获得太赫兹波段的超导材料,并得到一系列低损耗、高品质因素的超材料。同时,超导材料具有优异的磁场、温度等调谐性质,为太赫兹波的调控开辟了新的途径。

南京大学超导电子学研究所于 2010 年利用沉积在高阻硅(Si)上的 Nb 膜(厚度为 200 nm,转变温度为 9 K)加工制备了双开口的 SRR 结构的超材料,得到了谐振频率分别为 0.13、0.24、0.41 THz 的传输谱^[19]。利用连续太赫兹光谱系统和超导磁体对该超导材料进行传输谱的测量,发现谐振频率为 0.13 THz 附近的 6 K(超导态)和 26 K(正常态)的传输谱相差较大,经过拟合该传输曲线,得到超导态的无载品质因素 Q 值约为 86.5,明显高于正常态的品质因素,这主要是因为超导 Nb 膜的表面电阻,即欧姆损耗比较小。通过优化设计单元结构减少辐射损耗并提高薄膜质量可进一步提高 Q 值。由于外加磁场对超导薄膜有很好的调谐特性,该课题组还利用直流磁场研究了太赫兹超材料谐振频率分别为 0.13 THz 和 0.41 THz 的两个模式的调谐特性,谐振频率和传输系数都随外加磁场的增加而发生了很大的变化。这是因为在外加磁场的作用下,超导 Nb 膜的超导电性,如穿透深度、临界电流密度等都发生了变化,导致损耗增加、超材料的谐振减弱。当外加磁场超过临界磁场时,超导电性消失,此时的传输谱与正常态传输谱几乎一样。因此,利用超导 Nb 膜可以得到低损耗、可调谐的太赫兹器件。

除了低温超导 Nb 外,高温超导材料也可以成为超导超材料的优选。2010 年,美国俄克拉荷马州立大学和天津大学太赫兹中心的 Gu 等^[20] 利用高温超导 YBCO 薄膜制备太赫兹超材料,其为 SRR 结

构,随着工作温度从室温开始下降,到超导转变温度 86 K 以下,YBCO 的损耗也大幅降低,导致谐振显著增强,透射率被大幅度调制。同样在 2010 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Chen 课题组^[21]也研究了基于高温超导 YBCO 的太赫兹超材料,实现了温度调控,但是谐振频率和幅度都可以被调谐,结果如图 1 所示。当 YBCO 薄膜从正常态进入超导态时,谐振频率也发生了偏移,这主要是由超导薄膜的动态电感引起的。

南京大学超导电子学研究所 2011 年、2012 年利用超导 NbN 膜(厚度为 200 nm,转变温度约为

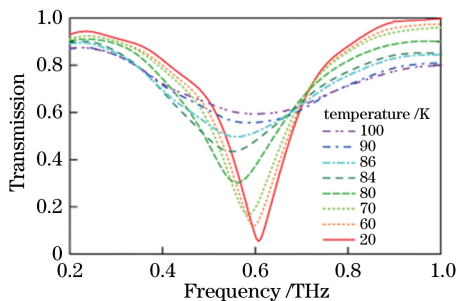


图 1 基于 180 nm 厚 YBCO 超导材料的太赫兹传输谱^[21]

Fig. 1 THz transmission spectra based on 180 nm thick YBCO superconducting metamaterial^[21]

15.8 K),采用电场耦合的 LC 谐振(ELC)结构,得到了工作频率分别为 0.58、0.82、1.02 THz 的超材料器件,如图 2 所示, E 、 H 分别为太赫兹电场强度和磁场强度^[22-23]。该结构图形的中间间隙可等效于一个电容(C),外部的环可等效于一个电感(L),总体相当于形成 LC 谐振。从其太赫兹传输谱可以看出,在超导态(8 K)时,该传输谱的吸收峰非常尖锐,意味着该器件有很低的损耗和很大的 Q 值。与之形成对比的是,利用同样 200 nm 厚的金(Au)膜,加工制备了同样结构的样品,但 Au 膜样品的谐振强度明显减弱。经过计算得到,NbN 膜器件的无载 Q 值为 178,而 Au 膜器件的无载 Q 值仅为 7,相差了 24 倍。即使增加工作频率到 1.02 THz,Au 膜器件的无载 Q 值也仅达到 90 左右,如图 2(b)所示。同样的样品,除了可以外加温度进行调谐,也可以外加磁场进行调谐。南京大学超导电子学研究所和天津大学太赫兹中心合作,于 2014 年利用同样的 ELC 结构和 NbN 薄膜,研究了外加磁场对太赫兹波段 NbN 超导超材料的调谐特性的影响^[24]。可以看出,外加磁场可以实现类似于温度调谐的特性。因此,超导薄膜为低损耗、可调谐的高品质因素太赫兹功能器件的设计和制备提供了一个很好的选择。

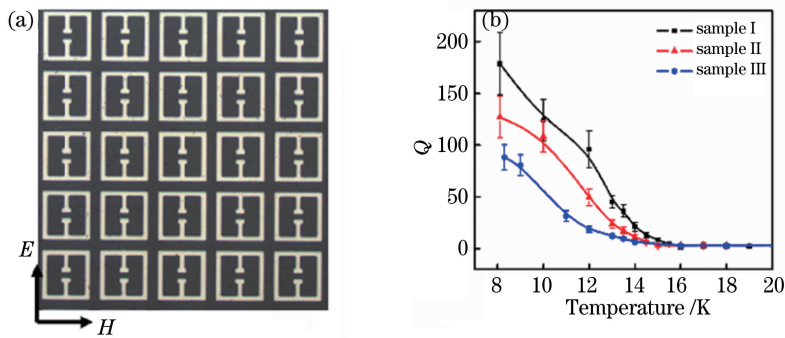


图 2 基于超导 NbN 膜的超材料。(a)显微照片;(b)无载品质因素(Q)随温度的变化^[23]

Fig. 2 Metamaterial based on superconducting NbN film. (a) SEM image; (b) unloaded quality factor (Q) versus temperature^[23]

被动功能器件存在一个通病,当器件的材料、结构、尺寸确定后,往往只能在某个频点、指定的带宽内实现高效响应,如果偏离了中心工作频率,其相应的性能便会受到很大的影响。随着时代的发展,人们越来越希望太赫兹功能器件具有实时动态调控的能力,由于超导材料在太赫兹波段具有优异的低损耗、可调谐特性,因此成为主动太赫兹功能器件的极佳选择。

2012 年,南安普顿大学 Zheludev 课题组^[25]基

于 Fano 谐振在亚太赫兹波段利用超导 Nb 膜和非对称 SRR 首次设计了一种电调制器,结构和结果如图 3 所示。他们利用 Nb 膜构成了一个非对称的 SRR,并通过外加偏置电流使得部分超导薄膜进入正常态,增加了电磁波的损耗,进而降低了 Fano 谐振的传输峰值,实现了超导态与非超导态的快速转变,最终实现了对电磁波的调制,并获得了高达 100 kHz 的动态调制效果,这为低温超导功能器件的设计提供了新的思路和方法。

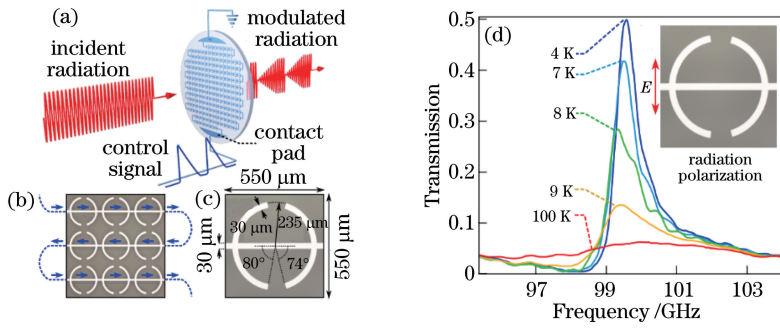


图 3 基于超导 Nb 膜的电调制器。(a)通过施加电流对亚太赫兹辐射进行调制;(b)样品的显微照片,水平箭头表示电流方向;(c)样品结构单元的尺寸图;(d)温度分别低于和高于超导转变温度(9 K)的太赫兹传输谱图^[25]

Fig. 3 Electrical modulator based on superconducting Nb film. (a) Sub-THz radiation modulated by passing current; (b) micrograph of sample with horizontal arrows indicating the direction of electric current; (c) detailed dimensional drawing of structural unit of sample; (d) THz transmission spectra for temperatures below and above superconducting transition temperature (9 K)^[25]

2016 年,南京大学超导电子学研究所利用 NbN 薄膜实现了电控的太赫兹开关,当器件处于 4.5 K 的工作温度时,0.507 THz 处的传输系数高达 0.98,0.9 V 的外加直流偏置电压却实现了 80.6% 的调制深度^[26]。而当直流偏置电压从 0 V 提高到 0.9 V 时,两个子谐振器的透射谷变宽且峰值随着电压的增加而减少。这主要是因为随着偏置电压的增大,谐振器中超导薄膜开始从超导态向正常态转变,电阻的增大影响了器件的欧姆损耗。与此同时,其中一个子谐振频率因薄膜结构中存在的动态电感效应而出现偏移,当电压达到 0.9 V 时,其红移到 0.507 THz 处,原本透射峰的位置转变为鱼鳞状谐振器(FSR)的透射谷,此时该频点的透射系数为 0.19,幅度变化超过 80%。在南安普顿大学 Zheludev 课题组^[25]的实验中,即使他们所加的电压值达到 38 V 时,调制深度才达到 46.5%。相比较而言,文献^[26]的结果无论在调制深度还是偏置电压的幅度上均有了非常明显的提高。

2017 年,南京大学超导电子学研究所又基于电磁诱导透明(EIT)效应设计了另外一种电控超导材料调制器,并实现了对太赫兹波的动态调制测量。通过太赫兹时域光谱系统表征了调制器的传输特性,其在透明窗口处可以实现 45%~79.8% 的调制深度。在此基础上,还对器件进行了动态测量^[27]。在外加正弦电压控制信号的作用下,该超导调制器的调制速率接近 1 MHz,如图 4 所示,其中, $a = 108 \mu\text{m}$, $b = 46 \mu\text{m}$, $c = 16 \mu\text{m}$, $w = 5 \mu\text{m}$, 周期 $P = 120 \mu\text{m}$ 。与南安普顿大学 Zheludev 课题组^[25]的实验结果相比,文献^[27]所报道的调制速率提高了一个量级。这个太赫兹调制器的设计方法和思路为高

性能低温太赫兹系统提供了一个理想的解决方案。

2.3 超人工电磁超材料模拟物理现象

EIT 现象是一种非线性量子效应,最早是在三能级的原子系统中观察到,在很宽的吸收谱上,本应不透明的介质上出现了窄带状透明窗口。最近,研究人员提出了用人工电磁超材料模拟电磁诱导透明现象的设想。在这种结构中,具有相同或接近谐振频率和不同谐振线宽的高辐射谐振器(或明谐振器)与暗谐振器的相互干涉导致光谱上出现电磁诱导透明现象。2011 年南京大学超导电子学研究所利用厚度为 200 nm 的 NbN 薄膜实现了模拟 EIT 现象^[28]。每个单元包含一个明谐振器(右边的金属带)和暗谐振器(左边的双开口环)。从测量得到的随温度变化的透射谱可以明显观察到一个透明传输窗口。随着温度的降低,超导薄膜从正常态转变到超导态后,可以得到一个最大的传输系数和最宽的透明窗口。同时,谐振谷和透明窗口的频率也会随温度而发生变化。根据测到的相位谱图,可以很容易地计算并得到群延迟谱,其随温度也有显著的变化。当温度为 8 K 时,群延迟达到了 4 ps,具有非常显著的慢光效果。

随后该小组于 2013 年又报道了另一种结构增强的 EIT 现象^[29]。与 2011 年报道的结果不同的是,此次研究分析了两种类型的样品:1) 超导 NbN 薄膜,其内、外环都是由 NbN 薄膜制成;2) 超导 NbN 薄膜与金属的复合结构,NbN 薄膜形成内环 SRR 结构的 LC 振荡,由于损耗低、Q 值较高,Au 形成外闭环的偶极子振荡,Q 值相对较低。这样的金属-超导复合结构的电磁感应透明超材料,两个谐振器都可以在入射电场下直接激发,明、暗谐振器

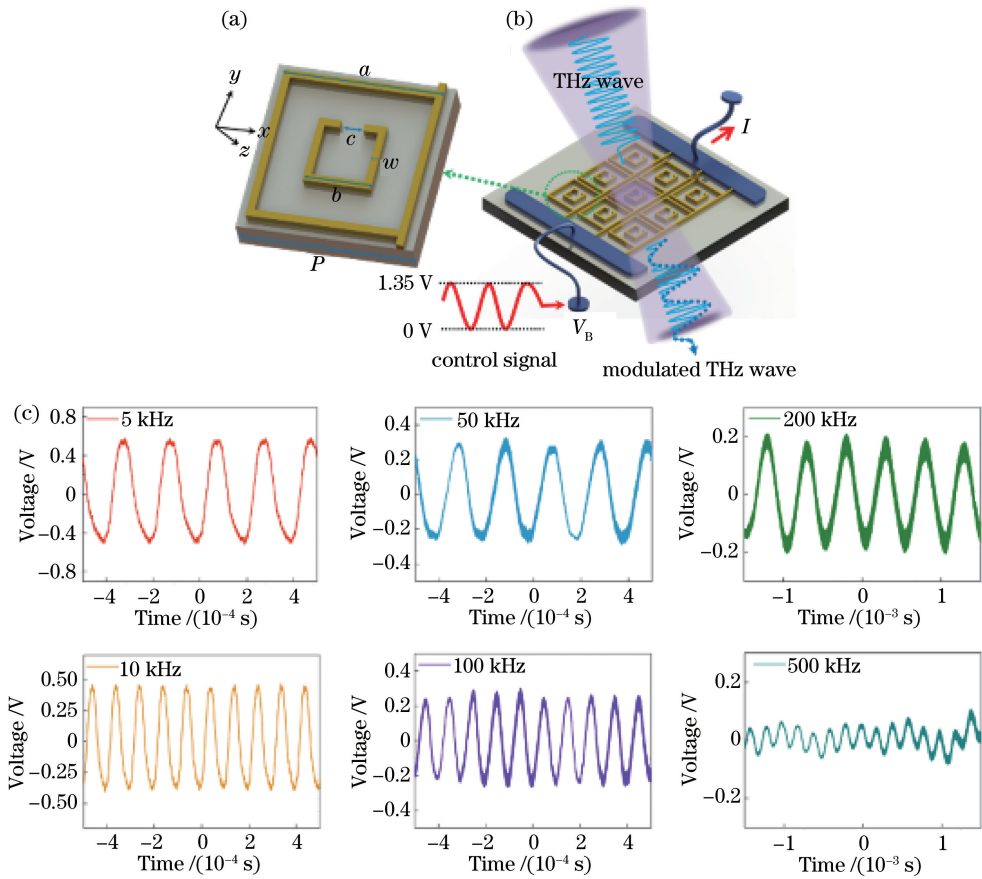


图 4 太赫兹超导电调制器。(a)超材料基本单元的几何尺寸;(b)调制器的原理图;
(c)动态系统测量中不同调制频率的太赫兹信号^[27]

Fig. 4 THz superconducting electrical modulator. (a) Geometric dimension of metamaterial elementary unit; (b) schematic of modulator; (c) THz signals with different modulation frequencies in dynamic system measurement^[27]

之间的耦合作用更强。从实验结果可以看出,纯 NbN 的样品群延迟-带宽积可达到 0.37,远远大于 NbN-Au 复合结构的群延迟-带宽积的 0.17,因此慢光效果更好。

同时,美国俄克拉荷马州立大学、洛斯阿拉莫斯国家实验室,日本大阪大学与中国天津大学合作,也于 2013 年报道了利用高温超导 YBCO 薄膜实现的 EIT 现象^[30]。在该研究中,他们利用超导-金属复合超材料结构,使得超导 YBCO 薄膜形成外环明模谐振(27 K 时, Q 值约为 0.88),金属形成暗模 SRR 谐振(Q 值为 7.71),最终观测到电磁诱导透明现象,且实现了温度调控的主动太赫兹超材料。

在光学频段,金属具有显著的等离子体(SPP)性质,介电常数的实部为负数,且绝对值远大于介电常数虚部。超导材料在太赫兹及更低频段与金属在光学频段的电磁响应极为相似,负的介电常数和动态电感效应可将超导体视为等离子体媒质。从微观层面来看,超导电子对的平均自由程很长,可以几乎

无散射地通过晶格。同时,超导载流子浓度可以通过外加温度、磁场、抽运孔、光等方式对 SPP 进行调控。超导薄膜表面 SPP 的激发和传播特性日益引起研究人员的关注,超导材料的等离子体性质以及低损耗和可调谐性使其在太赫兹等离激元光子学中具有良好的前景。2010 年,在高温超导薄膜 YBCO^[31]和低温超导薄膜 NbN^[32]亚波长小孔阵列的透射谱中,相继观察到了透射增强的现象。

宇称-时间(PT)对称是量子力学中的一个物理现象。天津大学太赫兹中心和南京大学超导电子学研究所在 2017 年利用 NbN-Au 复合超材料观测到 PT 对称性^[33]。在该研究中,结构单元由两个环构成,其中一个环由金属 Au 制成,另一个环由超导 NbN 制成,通过调谐其中超导环的谐振,就可以观测到 PT 对称性的破坏过程。

2.4 非线性太赫兹超导体人工电磁超材料

随着人工电磁材料技术的发展,超材料在非线性方面的应用逐渐受到人们的关注。最近,强场太

赫兹的发展也为太赫兹波段非线性器件的发展提供了可能。超导人工电磁超材料因其对外在环境比较敏感,成为非线性超材料的极佳选择。2013年,日本大阪大学激光工程研究所与南京大学超导电子学研究所合作,制备了基于50 nm厚NbN薄膜的非线性太赫兹超材料^[34]。随着入射太赫兹电场由最小值增大到最大值,该材料的透射谱谐振强度由最强减弱到几乎无谐振,但谐振频率几乎不随入射太赫兹电场的变化而变化,这与温度调谐时透射率和谐振频率同时都被显著调控不相同。该课题组同年还报道了不同厚度的超导薄膜和超导材料的非线性调制效果^[35]。同样在2013年,美国Chen课题组^[36]报道了基于高温超导YBCO薄膜的非线性超材料,结果显示YBCO超材料的透射系数也随着入射太赫兹电场强度的变化而变化。

2016年,南京大学超导电子学研究所报道了EIT现象和亚波长小孔阵列异常透射的非线性特性^[37-38],其样品是基于50 nm厚的NbN超材料,在强太赫兹场照射下,超导薄膜的电子对被破坏,薄膜的表面阻抗增加,导致其谐振峰变弱,传输谱中两个谐振峰的强度随着太赫兹电场(E_0 表示最大的太赫兹电场)的增强,传输系数由-22 dB变化到-3 dB。但是中间的透射峰大小基本没有变化,其传输系数保持在1左右。为了解释这个现象,引进复合耦合模理论计算入射电场变化时谐振器各个参数的变化。这种方法的优点是可以分别研究各个参数对谐振特性的影响,并且可以分别计算子谐振器的各个参数。图5所示为根据上述耦合波理论计算得到的两个子谐振器的欧姆损耗 Γ 、辐射损耗 γ 和两者之间的耦合系数 k ,其中下标1、2分别对应明、暗两个子谐振器。从图5可以清楚地看到,除了明谐振器的欧姆损耗外,其他参数基本不随入射太赫兹场强的变化而变化。这是因为明谐振器首先感受到入射电场,而暗谐振器与明谐振器的耦合系数较小,因此它感受到一个较低的入射电场,而这个电场对于超导薄膜的影响较小,所以暗谐振器的超导薄膜表面电阻没有太大的变化。从这个分析可以看出,复合结构的超导材料的构成单元——两个谐振器,在同一个人射电场情况下,可以表现出不同的特性,这为分别调控谐振电路,并操控太赫兹传输特性提供了一个新途径。

2.5 量子超材料

近年来,具有量子效应的超导材料同样引起了人们的广泛关注^[18, 39]。早在20世纪,研究人员就

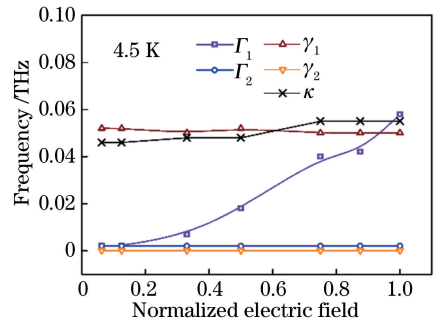


图5 利用复合模型从实验测到的传输谱提取到的拟合参数^[37]

Fig. 5 Fitting parameters extracted from experimentally measured transmission spectrum using hybrid model^[37]

提出了在包含约瑟夫森结的宏观电路中实现量子相干的设想。利用低电容约瑟夫森结电路中呈现的宏观量子效应可以实现多种超导两级量子系统,能够以二进制形式存储信息,如超导量子比特或量子比特。目前,这些固态量子比特器件是量子信息处理的核心,因为它们可以满足量子计算机的构建要求^[40-42]。超导量子比特变量依赖于约瑟夫森效应而使用电荷、磁通量、自由相位来实现量子计算机^[43]。2009年,Pashkin等^[44]研制的商用量子计算机D-Wave 2XTM使用了超过1000个超导比特的CPU(升级了的D-Wave TwoTM使用了512个量子比特CPU)^[44]。

超导量子超材料是使用含有量子效应的约瑟夫森结等作为周期结构的“原子单元”来获得具有一定量子效应的超材料。作为超导电子学的基本元件,19世纪60年代发展起来的由超导线和约瑟夫森结组成的超导量子干涉仪(rf-SQUID)与SRRs有很多相似之处,将SQUID与超材料相结合可以得到量子超材料,并调控其中的量子能级,同时也可以获得负的磁导率^[18]。在最近报道的超导量子超材料的工作中^[45],使用了20个排列在双链结构中的超导磁通量子比特,在实验中实现了量子效应并对其进行理论分析。近年来,关于超导量子比特的研究取得了很大的进展,包括设计、加工和测量技术。虽然这些进步主要以量子计算机为目标,但是也促进了超导量子超材料的发展。从整体来看,约瑟夫森结阵列的制作工艺还是相当复杂的,同时量子调控对温度和噪声环境的要求又极其严格,因此量子超导材料的发展还面临很多挑战。

3 结 论

太赫兹超材料的发展为太赫兹波段匮乏的器

件、材料提供了很好的发展途径,借助太赫兹超材料,可以得到所需要的功能器件^[46-48]。而超导人工电磁超材料具有一般金属超材料所没有的低损耗,及对外界环境非常敏感等特点。利用超导材料,可以解决目前太赫兹功能器件损耗大、性能不够高、难调控等关键问题,是目前太赫兹高性能器件的优选。当然,超导材料也具有一些缺点,目前太赫兹波段超导人工电磁超材料发展的一大限制是制冷问题,维持低温环境需要的成本比较高,对工作人员的要求也比较高,普及难度较大。另一大限制就是加工工艺比较复杂,目前世界上能制备出质量较好的超导薄膜的单位比较少,而可用于量子超材料的阵列约瑟夫森结的制备更是难上加难,这些均制约了太赫兹波段超导超材料技术的发展。将来微加工工艺的进一步发展,将会推动超导材料的广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Huber R. Terahertz collisions [J]. *Nature*, 2012, 483(7391): 545-546.
- [4] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, *et al.* Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [5] Chen H T, O'Hara J F, Azad A K, *et al.* Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5): 295-298.
- [6] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, *et al.* Electrically resonant terahertz metamaterials: theoretical and experimental investigations [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(4): 041102.
- [7] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, *et al.* Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(10): 107401.
- [8] Yen T J. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [9] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [10] Jung P, Ustinov A V, Anlage S M. Progress in superconducting metamaterials [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2014, 27(7): 073001.
- [11] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [12] Anlage S M. The physics and applications of superconducting metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(2): 024001.
- [13] Singh R, Tian Z, Han J G, *et al.* Cryogenic temperatures as a path toward high-Q terahertz metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(7): 071114.
- [14] Rogalla H, Kes P. 100 years of superconductivity [M]. New York: CRC press, 2011.
- [15] Tinkham M. Introduction to superconductivity[M]. New York: R. E. Krieger Publishing Company, 1980.
- [16] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, *et al.* Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(9): 908-910.
- [17] Ricci M, Orloff N, Anlage S M. Superconducting metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(3): 034102.
- [18] Lazarides N, Tsironis G P. rf superconducting quantum interference device metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(16): 163501.
- [19] Jin B B, Zhang C H, Engelbrecht S, *et al.* Low loss and magnetic field-tunable superconducting terahertz metamaterial[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17504-17509.
- [20] Gu J Q, Singh R, Tian Z, *et al.* Terahertz superconductor metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(7): 071102.
- [21] Chen H T, Yang H, Singh R, *et al.* Tuning the resonance in high-temperature superconducting terahertz metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(24): 247402.
- [22] Wu J B, Jin B B, Xue Y H, *et al.* Tuning of superconducting niobium nitride terahertz metamaterials[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12021-12026.
- [23] Zhang C H, Wu J B, Jin B B, *et al.* Low-loss terahertz metamaterial from superconducting niobium nitride films[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 42-47.
- [24] Wang D Y, Tian Z, Zhang C H, *et al.* Terahertz superconducting metamaterials for magnetic tunability[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(9): 094013.
- [25] 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.

- [26] Li C, Zhang C H, Hu G L, *et al.* Electrically tunable superconducting terahertz metamaterial with low insertion loss and high switchable ratios [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(2): 022601.
- [27] 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.
- [28] Wu J B, Jin B B, Wan J, *et al.* Superconducting terahertz metamaterials mimicking electromagnetically induced transparency [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 161113.
- [29] 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.
- [30] Cao W, Singh R, Zhang C H, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials: active near field coupling between bright superconducting and dark metallic mode resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(10): 101106.
- [31] Tian Z, Singh R, Han J G, *et al.* Terahertz superconducting plasmonic hole array [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3586-3588.
- [32] Wu J B, Dai H, Wang H, *et al.* Extraordinary terahertz transmission in superconducting subwavelength hole array [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1101-1106.
- [33] 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.
- [34] Zhang C H, Jin B B, Han J G, *et al.* Terahertz nonlinear superconducting metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 081121.
- [35] Zhang C H, Jin B B, Han J G, *et al.* Nonlinear response of superconducting NbN thin film and NbN metamaterial induced by intense terahertz pulses [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(5): 055017.
- [36] Grady N K, Perkins B G, Hwang H Y, *et al.* Nonlinear high-temperature superconducting terahertz metamaterials [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(10): 105016.
- [37] Zhang C H, Wu J B, Jin B B, *et al.* Tunable electromagnetically induced transparency from a superconducting terahertz metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(24): 241105.
- [38] Wu J B, Zhang C H, Liang L J, *et al.* Nonlinear terahertz superconducting plasmonics [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(16): 162602.
- [39] Du C G, Chen H Y, Li S Q. Quantum left-handed metamaterial from superconducting quantum-interference devices [J]. *Physical Review B*, 2006, 74(11): 113105.
- [40] Devoret M H, Schoelkopf R J. Superconducting circuits for quantum information: an outlook [J]. *Science*, 2013, 339(6124): 1169-1174.
- [41] Paraoanu G S. Recent progress in quantum simulation using superconducting circuits [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2014, 175(5/6): 633-654.
- [42] Georgescu I M, Ashhab S, Nori F. Quantum simulation [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86(1): 153-185.
- [43] Josephson B D. Possible new effects in superconductive tunnelling [J]. *Physics Letters*, 1962, 1(7): 251-253.
- [44] Pashkin Y A, Astafiev O, Yamamoto T, *et al.* Josephson charge qubits: a brief review [J]. *Quantum Information Processing*, 2009, 8(2/3): 55-80.
- [45] MacHa P, Oelsner G, Reiner J M, *et al.* Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5146.
- [46] Li Y H, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0314001.
李永花, 周璐, 赵国忠. 基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0314001.
- [47] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, *et al.* Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0513002.
梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器 and 光开关 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0513002.
- [48] Cao J G, Zhou Y X. Polarization modulation of terahertz wave by graphene metamaterial with grating structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092501.
曹建国, 周译玄. 栅状结构石墨烯超材料的太赫兹波偏振调制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 092501.