

# 基于超材料局域场增强效应的能量转换超表面设计研究

成 婕<sup>1</sup>, 王 莹<sup>2</sup>

(1. 四川省药品检验研究院, 成都, 611731; 2. 西南石油大学新能源与材料学院, 成都, 610500)

**摘要** 设计了一种能将电磁能转化为局域温度场的超材料结构。超材料的局域电场增强效应可以产生强电场并激发电磁能-热能转换。电磁波能量通过无线方式耦合到超材料表面, 因此可以实现无线能量的收集。实验表明, 合理的结构设计可以有效地把空间电磁波以热能的形式局域于空间有限体积内。在 7 W 的入射电磁波下, 局域温度场增强达到的最高温度为 201 °C。通过与热电材料 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 组合设计出了将电磁波能量转化为电能的能量收集装置。7 W 电磁波照射下实验测量单个结构单元的输出电压为高达 27 mV。

**关键词** 超材料; 局域温度场增强; 电磁能量转换; 无线能量传输

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.005

**中图分类号** TB34;O441.6 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0030-05

## Research on Design of Energy Conversion Metasurface Based on Local Field Enhancement Effect of Metamaterials

CHENG Jie<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>

(1. Sichuan Institute for Drug Control, Chengdu 611731, China; 2. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract** A meta-material structure which is used to transform electromagnetic energy into a local temperature field is designed. The local electric field enhancement effect of metamaterials can generate strong electric fields and achieve the electromagnetic energy-thermal energy conversion. The electromagnetic wave energy is coupled to the surface of the meta-material through a way of wireless, collecting the wireless energy. The experiments show that the energy of electromagnetic wave can be localized in finite space as heat energy via reasonable structural design. The highest temperature of local temperature field enhancement can reach at 201 °C. Through combining with thermo-material Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, an energy collector which is used to convert the electromagnet energy into the electric energy is designed. The output voltage of a single structural unit is as high as 27 mV under an incident microwave of 7 W.

**Key words** meta-material; local temperature field enhancement; electromagnetic energy-thermal energy conversion; wireless energy transmission

电磁超材料是一种具有亚波长结构单元的周期性结构功能材料, 可以实现自然界天然材料所不能实现的特异电磁现象, 例如负折射率等<sup>[1]</sup>。通过巧

妙的设计, 电磁超材料可以实现电磁波的操控<sup>[2]</sup>。近年来, 基于电磁波段至光波段超材料设计的电磁隐身斗篷<sup>[3-4]</sup>、完美吸波体<sup>[5-6]</sup>以及超透镜<sup>[7]</sup>, 已经在

**收稿日期:** 2021-04-07

**作者简介:** 成 婕(1989—), 女, 四川成都人, 硕士生, 研究方向为电磁医疗器械设计与开发。E-mail: cjphys@126.com

**引用格式:** 成婕, 王莹. 基于超材料局域场增强效应的能量转换超表面设计研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 30-34.  
CHENG Jie, WANG Ying. Research on Design of Energy Conversion Metasurface Based on Local Field Enhancement Effect of Metamaterials [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 30-34.

实验室被证明其理论的可行性。随着超材料研究的进展,利用超材料设计的实用性器件引起人们的关注。最近,基于超材料设计的成像器件<sup>[8]</sup>、传感器件<sup>[9-10]</sup>以及通讯系统调制器<sup>[11-12]</sup>已经初步具备实用价值。

超材料是以亚波长结构单元构成的人造材料。Pendry 等人指出,当超材料是以电谐振结构单元构成时,以谐振频率入射的电磁波能量将被限域于发生谐振的超材料结构单元<sup>[13]</sup>。由于电磁波的能量与其电场或者磁场相关,所以当发生谐振时,超材料结构单元会发生电场或者磁场的局域增强现象。例如典型的开口谐振环(SRRs)结构,当发生电磁谐振时在其开口处能观察到显著的电场增强效应<sup>[14]</sup>。S. Bagiante 等人证明,当 SRRs 的开口减小到 100 nm 时,在 50 GHz 的电磁波激励下发生谐振时,开口处的电场强度可以增强 14 000 倍<sup>[15]</sup>。同时,材料的非线性效应可通过局域电场增强效应显著提高。迄今为止,研究人员发现利用局域电场增强效应可以实现二次谐波产生<sup>[14,16]</sup>,非线性可调制超材料<sup>[17-18]</sup>,以及双稳态介质等<sup>[19]</sup>。最近,关于局域电场增强效应越来越受到人们关注。Pramod K. Singh 最近证明可以利用局域电场增强效应实现局域等离子体阵列的产生,并且观察到由巨电场增强效应导致的高次谐波产生<sup>[20]</sup>。

论文将超材料电磁谐振结构与空间电磁波通过无线方式耦合,研究了电场增强效应所导致的局域温度场增强效应,以及可能实现的无线电磁能量转换。在具体设计实现方案中,将高电磁损耗介质置于 SRRs 的开口间隙处,在谐振频率的电磁波激励下,增强的电场会耦合到高损耗的介质上,从而将集中的电磁波能量转化为热能。由于电磁能量与自由空间中的入射电磁波耦合,这意味着超材料结构上局域温度场增强或局域温度场增强阵列的产生可以无线操作。这种设计在电磁波能量收集、检测器件、成像器件以及电磁开关等领域有潜在的应用。

## 1 局域温度场增强阵列

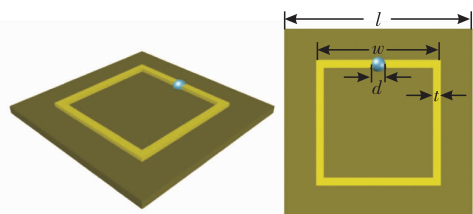


图 1 超材料结构单元

图 1 所示是该实验 SRRs 结构单元,其中  $l=24$  mm,  $w=13.8$  mm,  $t=1$ ,  $d=1$  mm。以 FR4 为支撑结构,厚度为 0.27 mm。谐振单元由金属铜构成,厚

度 0.018 mm,其他尺寸如图所示。高电磁损耗介质被设计置于 SRRs 开口处。选择以环氧树脂作为电磁损耗介质,其介电常数为 4.2,损耗角正切为 0.02。

如图 2 所示,电磁波能量由喇叭天线提供,在自由空间中向超材料辐射。电磁波能量耦合到超材料并在谐振频率下在 SRRs 的开口间隙中产生强电场,导致环氧树脂区域中的交变电场显著增强。由于环氧树脂的损耗系数高于周围,电磁波能量会转化为热能,形成局域温度场增强阵列。由于超材料的谐振频率取决于结构单元的形态,大小和分布,因此可以设计超材料以具有所需的形态和共振频率。此外,还可以以某种空间模式在空间上排列这些结构单元,以进一步控制局域温度场增强阵列的模式。设计中,准备了一块由  $6 \times 6$  阵列组成的超材料板,谐振频率为 2.55 GHz。

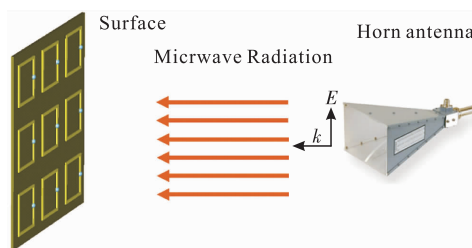
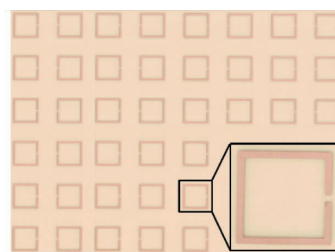
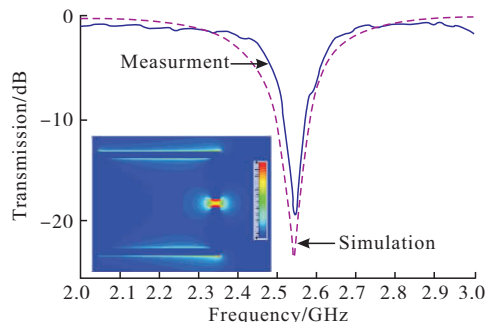


图 2 利用超材料产生温度场增强示意图

超材料板的照片如图 3(a)所示。模拟和测试结果如图 3(b)所示,清楚地显示了其具有 2.55 GHz 的谐振频率。由于超材料板的制造误差,与模拟结果相比,观察到测量的谐振频率有大约 0.005 GHz 的小幅偏移。谐振频率下的模拟电场分布如图 3(b)的插图所示。可以看出,电场在 SRRs 的间隙中显著增强。



(a) 超材料结构照片图



(b) 模拟和测试的该结构

图 3 模拟的结构单元的电场分布图

通过放大器从喇叭天线提供功率为 3 W 的电磁波。超材料表面到喇叭天线的距离为 5 cm。为了观察局域温度场增强阵列,使用热成像相机获取超材料表面的热分布特征。图 4(a) 为在 2.55 GHz 电磁波激励下超材料表面产生的局域温度场增强图像。可以看到最高温度出现在每个 SRRs 的开口处,温度约为 55 °C,比测试的室温(20 °C)高出约 35 °C。为了验证实验,使用 ANSYS Multiphysics 多物理场仿真软件模拟了超材料的温度分布。图 4(a) 显示的是单个 SRRs 的温度分布图像,可以看出,仿真结果与实验结果吻合较好。然而,软件模拟的最高温度为 61.1 °C,高于实验记录的最高温度,这可能是由于电缆和连接器的损耗导致的模拟和实验之间辐射功率有差异。在图 4(a) 中,还可以在超材料板中心的 4 个 SRRs 附近记录的最高温度高于相邻的 SRRs。这可能归因于 2 个原因:首先,喇叭天线的尺寸(7 cm×10 cm)比超材料板的尺寸(14.4 cm×14.4 cm)小,导致辐射更集中在超材料板的中心。其次,考虑喇叭天线的功率辐射模式,辐射电磁波功率集中在天线的中心,超材料板上的辐射电磁波不均匀。因此,假设如果使用能够辐射均匀电磁波功率的天线,可以获得均匀的局域温度场增强分布。

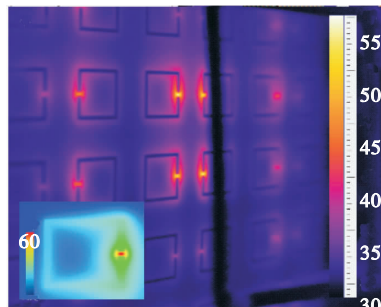
为了详细了解局域温度场增强效应,对不同辐射电磁波功率水平下的局域温度场增强分布和温度进行了研究。当入射电磁波功率变化时,局域温度场增强分布模式保持不变,如图 4(a) 所示,但最高记录温度随着入射电磁波功率的增加而增加。图 4(b) 显示了最高记录温度随入射电磁波功率变化趋势。可以看到,当入射电磁波的功率增加到 6 W 时,记录的最高温度可以增加至 80 °C 左右。

SRRs 是超材料的一种典型结构,其中入射电磁波感应出循环和振荡电流,产生垂直于环的磁偶极矩,它是一种磁性超材料结构,当入射电磁波的磁场垂直于 SRRs 时,它将表现出强磁共振。因此,推断当入射电磁波的磁场垂直于 SRRs 时,局域温度场增强的温度会更高。为了证明这一假设,模拟了垂直和平行于 SRRs 的入射电磁波磁场的电场增强。图 5 为入射电磁波磁场与 SRRs 表面垂直(红线)和平行(蓝线)时的场增强因子的仿真结果。场增强因子定义为<sup>[14]</sup>:

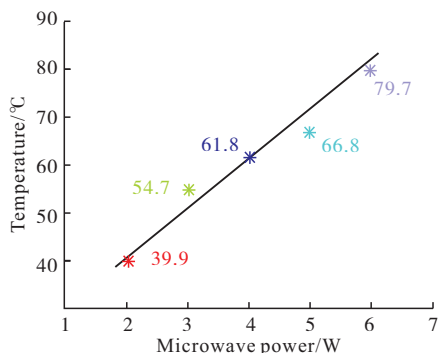
$$F(\nu) = \frac{E_{\text{gap}}(\nu)}{E_{\text{inc}}(\nu)} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{gap}}(\nu)$  表示间隙中电场的绝对幅度; $E_{\text{inc}}(\nu)$  表示入射电场的绝对幅度。可以看出当入射电磁波的磁场垂直于 SRRs 时,电场增强因子明显增强,由电磁波能转化为热能的比例更大,更高的电场强度

意味着有损介质的热能转换程度更高,间隙中的温度更高。



(a) 3 W 电磁波激励下超材料板的温度分布



(b) 超材料板最高温度分布与激励电磁波功率曲线

图 4 超材料表面的热分布特征

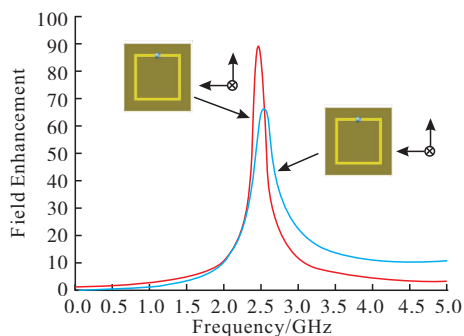


图 5 场增强因子仿真结果

图 6 显示了在 7 W 入射电磁波功率下 SRRs 阵列内的热分布,入射磁场垂直于 SRRs。SRRs 的结构单元尺寸大小与图 4(a) 所示的结构相同。在 7 W 的入射电磁波下,局域温度场增强达到的最高温度为 201 °C,远高于图 4(b) 所示的最高温度。

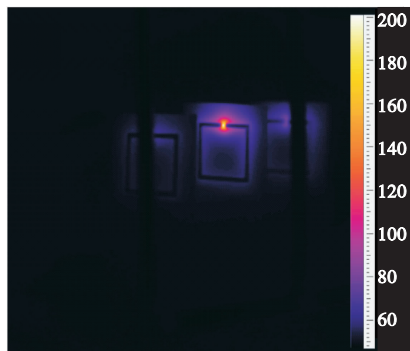


图 6 7 W 电磁波激发下超材料的温度分布图

## 2 电磁波能量收集

为了研究如何利用电磁热能转换,设计了一种电磁能量收集装置,将上述 SRRs 与热电材料相结合。简言之,带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  粘附在超材料单元的背面。带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的尺寸为  $1\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ 。带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的一端靠近 SRRs 的开口,另一端落在 SRRs 的另一边缘。带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  通过导热硅脂粘贴在 FR4 的另一侧,以确保良好的导热。该器件可以通过利用超材料结构中增强的电场引起的温度梯度来工作。通过在带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的末端通过塞贝克效应产生直流电压。测量表明,SRRs/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  复合结构的谐振频率为  $2.31\text{ GHz}$ ,比原始结构低约  $0.24\text{ GHz}$ 。谐振频率的降低来自  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,由于它是一种半导体材料,会影响超材料结构的共振频率。

研究了电磁波照射下 SRRs/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  复合结构的温度分布。通过放大器从喇叭天线提供功率为  $7\text{ W}$  的电磁波。超材料表面到喇叭天线的距离为  $5\text{ cm}$ 。图 7 显示了  $7\text{ W}$  电磁波激励下电磁能量收集的超材料两侧的表面温度分布。如图 7b 所示,最高温度为  $188.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,最低温度为  $38.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,温差约为  $149.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。电磁能量收集装置中使用的热电材料是 P 型  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  半导体,塞贝克系数约为  $0.19\text{ mV/T}$ 。因此可以计算出电磁能量收集装置的单个单元在  $7\text{ W}$  电磁波照射下的输出电压约为  $28.5\text{ mV}$ 。

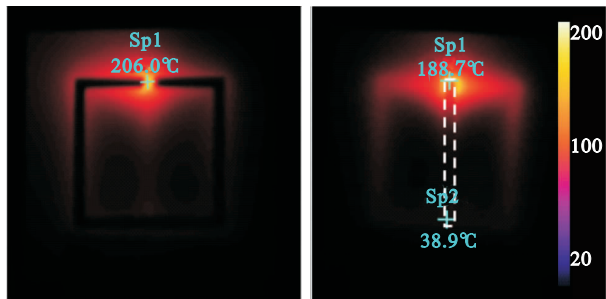


图 7 7 W 电磁波激励下电磁能量收集的温度分布图

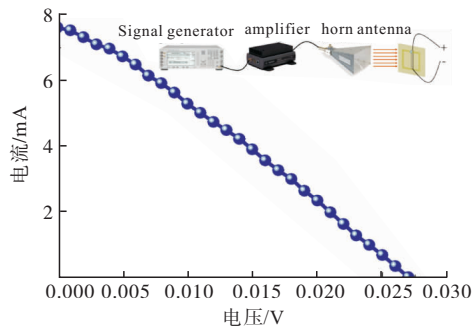


图 8 测量示意图

利用 CHI-660 电化学工作站在  $7\text{ W}$  电磁波照射下实验测量单个结构单元的输出电压。图 8 为测量示意图,显示了能量收集装置在  $7\text{ W}$  电磁波照射

下的单个单元电流-电压 (I-V) 特性。检测到输出电压高达  $27\text{ mV}$ ,与预测一致。由于带状线  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的电阻 ( $R$ ) 约为  $2\text{ }\Omega$ ,所以可以获得大约  $91.1\text{ }\mu\text{W}$  的最大输出功率。考虑单个晶胞的电磁波-电转换效率  $\eta$ ,这里的  $\eta$  简单地定义为单个结构单元产生的功率与电磁波功率的比值。所以单个晶胞的  $\eta$  大约为  $0.0013\%$ 。由于单元格的尺寸是  $24\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ ,而喇叭天线的尺寸为  $7\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。所以至少可以在  $7\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的面积上排列 15 个单元,以增加电磁能量收集装置的响应度。假设电磁波功率密度是均匀的,能量收集设备的  $\eta$  约为  $0.02\%$ 。

## 3 结语

通过使用多物理场数值模拟和实验评估了所提出的超结构在将电磁波能量转换为局域温度场。结果表明,通过将局域电场增强效应与超材料内的高损耗材料耦合,可以有效地收集电磁波能量以转换为热能。证明了可以基于这个想法设计电磁能量收集装置,并通过实验检测到有效的无线电磁波-电转换效率。此外,由于可以通过改变结构单元的尺寸和形态来调节超材料的共振频率,因此原则上可以在较高频率区域(例如太赫兹或红外区域)实现相同的物理效应。

## 参考文献

- [1] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5541): 77-79.
- [2] PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling Electromagnetic Fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [3] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [4] VALENTINE J, LI J S, ZENTGRAF T, et al. An Optical Cloak Made of Dielectrics [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(7): 568-571.
- [5] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 207402.
- [6] LIU N, MESCH M, WEISS T, et al. Infrared Perfect Absorber and Its Application as Plasmonic Sensor [J]. *Nano Lett*, 2010, 10: 2342-2348.
- [7] FANG N, LEE H, SUN C, et al. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens [J]. *Science*, 2005, 308: 534-537.
- [8] JACOB Z, ALEKSEYEV L V, NARIMANOV E.

- Optical Hyperlens: Far-Field Imaging Beyond the Diffraction Limit [J]. *Opt. Express*, 2006, 14: 8247-8256.
- [9] LIU N, WEISS T, MESCH M, et al. Planar Metamaterial Analogue of Electromagnetically Induced Transparency for Plasmonic Sensing [J]. *Nano Lett*, 2010, 10: 1103-1107.
- [10] O'HARA J F, SINGH R, BRENER I, et al. Thin-Film Sensing with Planar Terahertz Metamaterials: Sensitivity and Limitations [J]. *Opt Express*, 2008, 16: 1786-1795.
- [11] LUKENS J M, LEAIRD D E, WEINER A M. A Temporal Cloak at Telecommunication Data Rate [J]. *Nature*, 2013, 498: 205-208.
- [12] ZHU J, ELEFThERIADES G V. Dual-Band Metamaterial-Inspired Small Monopole Antenna for WiFi Applications [J]. *Electron Lett*, 2009, 45: 1104-1105.
- [13] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47: 2075-2084.
- [14] MERBOLD H, BITZER A, FEURER T, et al. Second Harmonic Generation Based on Strong Field Enhancement in Nanostructured THz Materials [J]. *Opt Express*, 2011, 19: 7262-7273.
- [15] BAGIANTE S, ENDERLI F, FABIANSKA J, et al. Giant Electric Field Enhancement in Split Ring Resonators Featuring Nanometer-Sized Gaps [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8051.
- [16] VALEV V K, ZHENG X, BIRIS C G, et al. The Origin of Second Harmonic Generation Hotspots in Chiral Optical Metamaterials Invited [C]// 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference. Munich, Germany: IEEE, 2011: 36-45.
- [17] SHADRIVOV V, KOZYREV A B, VAN DER WEIJDEN D W, et al. Tunable Transmission and Harmonic Generation in Nonlinear Metamaterials [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(16): 161903.
- [18] LIU M K, HWANG H Y, TAO H, et al. Terahertz-Field-Induced Insulator-to-Metal Transition in Vanadium Dioxide Metamaterial [J]. *Nature*, 2012, 487: 345-348.
- [19] WANG B N, ZHOU J F, KOSCHNY T, et al. Nonlinear properties of split-ring resonators [J]. *Opt Express*, 2008, 16: 16058-16063.
- [20] SINGH P K, HOPWOOD J, SONKUSALE S. Metamaterials for Remote Generation of Spatially Controllable Two Dimensional Array of Microplasma [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5964.

(编辑:徐楠楠)