

文章编号: 2095-4980(2021)05-0889-07

电磁二维可重构滤波器研究进展

赵贺锋, 朱永忠*, 江 川, 周余昂

(武警工程大学 信息工程学院, 陕西 西安 710086)

摘 要: 介绍了电磁二维可重构滤波器的背景、意义、国内外的发展现状及调节原理, 将电磁二维可重构滤波器分为利用磁电复合材料结构和利用磁可调和电可调混合结构两类, 并分别进行性能分析。重点对结构和材料各异的利用磁电复合的电磁二维可重构滤波器进行了性能参数上的对比, 最后总结了电磁二维可重构滤波器的现存问题和未来发展趋势。

关键词: 滤波器; 电磁二维可重构; 磁电复合材料; 基片集成波导

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020299

Research progress of electromagnetic two-dimensionally tuned filter

ZHAO Hefeng, ZHU Yongzhong*, JIANG Chuan, ZHOU Yuang

(School of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an Shaanxi 710086, China)

Abstract: The development of electromagnetic two-dimensionally reconfigurable filter is reviewed. The background, significance, development status and regulation principle of electromagnetic two-dimensionally reconfigurable filter are introduced. The electromagnetic two-dimensionally reconfigurable filter is divided into two types: magnetoelectric composite structure and magnetoelectric adjustable hybrid structure. The performance analysis of these two structures is carried out respectively. The performance parameters of the electromagnetic two-dimensionally reconfigurable filter with different magnetoelectric composite structures and different materials are compared. Finally the existing problems and future development trends are discussed.

Keywords: filter; electromagnetic two-dimensionally tuned; magnetoelectric composite; substrate integrated waveguide

无线通信技术的飞速发展以及频谱资源的紧张, 推进了作为射频前端承载着频率选择和抑制重要功能的微波滤波器的飞速发展。微波滤波器主要用于微波卫星通信、中继通信、电子对抗、雷达等通信系统的各个方面, 滤波器性能的好坏会直接影响整个通信系统的优劣。

与传统射频前端的滤波器组相比, 可重构微波滤波器具有小型化、低成本、低插入损耗的优势。一维的磁可重构、电可重构滤波器作为滤波器的主流, 广泛用于通信领域^[1]。传统的磁可重构滤波器调谐范围大, 品质因子高, 但外加偏置磁场的调谐方法, 导致调谐速度较慢, 且体积较大不易集成, 不能适应现今通信系统对器件快速调节及小型化的需求。电可重构滤波器体积小, 调谐速度快, 但存在调节范围小, 品质因数小的问题。综合磁可重构与电可重构的优缺点, 电磁二维可重构滤波器主要利用磁调谐范围宽泛进行粗调, 再利用电调谐范围小进行精细调谐, 既具备传统磁可重构滤波器高品质因数和大范围调节的优点, 又具有电可重构滤波器调谐快、高精度、能耗小、体积小的特点^[2]。在未来无线通信系统和军事平台具有巨大的应用潜力。

1 电磁二维可重构滤波器结构分类

实现电磁二维可重构滤波器主要有两种方式: a) 利用磁电复合材料实现磁场电场双调谐^[3-10]; b) 利用磁可

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771490); 陕西省自然科学基金资助项目(2018JM6055); 武警工程大学基础基金资助项目(WJY201606); 科研团队资助项目(KYTD201803)

*通信作者: 朱永忠 email:bsbs1980@sina.com

调器件和电可调器件的混合结构来实现磁场电场双调谐^[11-13]。

1.1 利用磁电复合材料

利用磁电复合材料的电磁二维可重构滤波器，磁调谐均通过外加偏置磁场，利用铁磁共振效应来改变共振频率，从而实现频率的调节。由于电调谐原理不同，可分为两类：基于铁磁/压电层合材料；基于铁磁/铁电层合材料。基于铁磁/压电层合材料是通过施加电场在材料上，利用逆压电效应和铁磁共振效应。即压电相由于压电效应会发生形变，由于外加层合结构的束缚，铁电相也会发生相应的形变，导致铁磁相的磁导率发生相应变化，引起铁磁共振场的偏移，从而实现电调谐；基于铁磁/铁电层合材料是在电场下，利用材料内部的弹性和电磁力场之间耦合产生的磁电效应，改变铁电材料的介电常数实现电调谐^[14]。这种结构的滤波器磁调谐的范围远大于电调谐的范围。

1.1.1 单加载平行微带结构

早期对电磁二维可重构滤波器的研究，更注重的是电调谐方式比传统磁调谐速度快得多，几乎没有考虑功耗。SRINIVASAN^[3]在 2005 年提出一种可以通过磁电相互作用实现电可调的铁氧体-铁电层合结构的微波带通滤波器，如图 1 所示。将单晶钇铁石榴石/铌酸铅镁钛酸铅(YIG/PMN-PT)磁电复合材料加载在耦合微带线之间，这是结构最简单的电磁二维可重构滤波器，主要依赖磁电复合材料。复合材料在电场的作用下发生形变，表现为铁氧体铁磁谐振中的磁场位移。经测量，在 5 kOe 的偏置磁场下，该滤波器可实现最大 420 MHz 的电调，且插入损耗为 2.5 dB。

2006 年，同一研究组的 TATARENKO^[4]以单晶钇铁石榴石/锆钛酸铅(YIG/PZT)代替 YIG/PMN-PT，结合耦合微带线，如图 2 所示，设计了一款在外加偏置磁场为 1.7 kOe 状态下，电调最大偏移为 125 MHz 的电磁二维可重构滤波器，插入损耗约为 5 dB。

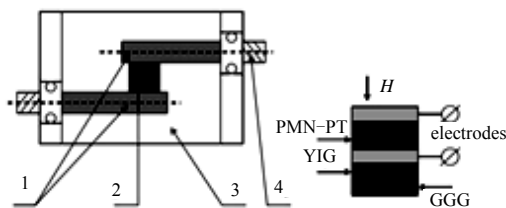


Fig.1 YIG/PMN-PT single resonator electromagnetic filter
图 1 YIG/PMN-PT 单谐振腔电磁滤波器

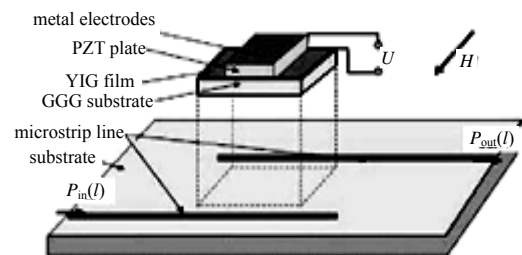


Fig.2 YIG/PZT single resonator electromagnetic filter
图 2 YIG/PZT 单谐振腔电磁滤波器

2012 年，XUAN^[5]将磁电层合材料作为基底与平行耦合滤波器结合，设计了一款电磁二维可重构微带带通滤波器。通过仿真施加 0~400 Oe 的偏置磁场，基本覆盖整个 5 GHz 频段。当外加偏置磁场为 450 Oe 时，其通带满足我国 802.11a 无线局域网频段(5 725~5 850 MHz)，具有巨大的应用前景。

1.1.2 双加载平行微带结构

2007 年，TATARENKO^[6]研究了锂钆铁氧体/锆钛酸铅(LZFO/PZT)和单晶钇铁石榴石/锆钛酸铅(YIG/PZT)的微波磁电耦合效应。对比 YIG/PZT 与 LZFO/PZT 的磁电耦合强度，发现具有较大共振的 YIG/PZT 更适合微波器件，并设计了一款通过磁场可实现 4~10 GHz 的宽范围调节，插入损耗大于 10 dB，在 ± 8 kV/cm 的电压范围内，可实现约占中心频率 1% 的调谐范围的磁电双可调滤波器。相较于传统的单谐振腔磁电双可调滤波器结构，该滤波器由 2 个加载谐振腔构成，如图 3 所示。

1.1.3 T 型耦合微带结构

2011 年，YANG^[7]利用钇铁石榴石薄膜/铌酸铅锆钛酸铅(YIG/PZN-PT)设计了一款电磁二维可重构带通滤波器。该滤波器创新地改变微带线的结构，将具有铁磁谐振特性的单晶 YIG 薄膜作为谐振器，耦合到 T 型耦合微带结构，如图 4 所示。在外加 50~250 Oe 的较小偏置磁场下，可实现 1.5~2.4 GHz 的频率调谐；随着外加偏置磁场的增加，滤波器的 3 dB 带宽从 10 MHz 增加到 40 MHz，且插入损耗小于 2 dB；电场调节可实现 200 MHz 的频率漂移。但在磁调谐时，随着外加偏置磁场的增加，3 dB 带宽会变宽，不能保持恒定。

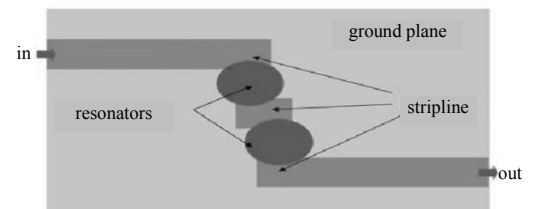


Fig.3 YIG/PZT double resonators electromagnetic filter
图 3 YIG/PZT 双谐振腔电磁滤波器

1.1.4 微带阻抗结构

2011 年, XUAN^[8]将 YIG/PZT 复合材料和蜿蜒微带线结合, 设计了一种蜿蜒微带电磁二维双可调双阻带滤波器, 如图 5 所示, 该滤波器能用一个偏置磁场或电场同时调谐 2 个阻带。与单微带线相比, 该结构体积更小, 更适合现代通信系统。

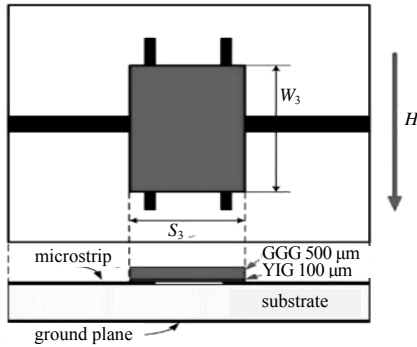


Fig.4 T-structure YIG/PZN-PT electromagnetic filter
图 4 T 型 YIG/PZN-PT 电磁滤波器

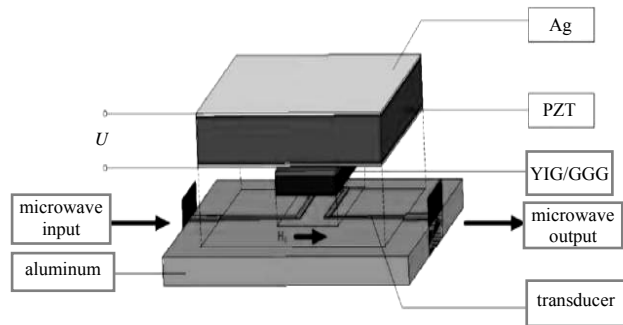


Fig.5 Winding microstrip electromagnetic double stopband filter
图 5 蜿蜒微带电磁双阻带滤波器

2013 年, ZHOU^[9]基于铁氧体的铁磁共振原理和 YIG 与 PZT 之间的磁电效应, 在通带为 0~2.5 GHz 的阶跃阻抗低通滤波器的基础上, 引入 YIG/PZT 磁电层合材料构成电磁二维可重构双通带滤波器, 实现了在外加偏置磁场为 234 Oe 时, TD-SCDMA 的 A 段和 B 段的 -3 dB 双通, 其中 1.92~2.01 GHz 的阻带最大插入损耗为 -34 dB。

除以上结构, 文献[10]将通过旋转喷射工艺得到的镍锌铁氧体薄膜(NiZn)磁电复合材料斜放置在微带线间, 并将微带铜板与 PMN-PT 压电板相粘合, 设计了一款电磁二维可重构超宽带通滤波器, 如图 6 所示。在垂直于馈源线方向施加 100~4 000 Oe 的偏置磁场, 可实现 3.78~5.27 GHz 的谐振频率调谐, 插入损耗为 1.73~3.42 dB。通过在 PMN-PT 板上附加电场, 磁电耦合效应实现了电压可调特性, 即 2.075~2.295 GHz 的中心频率可调。相较磁调, 电调插入损耗较大。

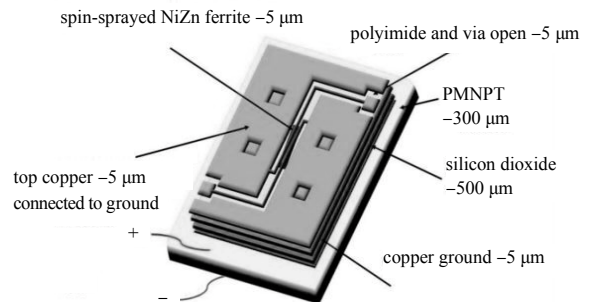


Fig.6 Reversed S-structure electromagnetic filter
图 6 倒 S 型电磁可调滤波器

1.2 磁可调器件和电可调器件混合结构

现有对混合结构的电磁二维可重构滤波器研究较少, 加拿大蒙特利尔大学 WU 课题组做过这方面的研究。2012 年, WU^[11]通过在基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)侧壁嵌入 YIG 铁氧体薄片实现磁可调; 将变容二极管嵌入谐振腔中心, 通过改变电容的大小实现电可调。在固定中心频率为 12 GHz 时, 可以实现 3%~5%带宽可调; 在 4.4%的恒定带宽下, 外加 0~2 800 Oe 偏置磁场, 中心频率调谐范围为 10.8~11.95 GHz, 约占 10%。2015 年, WU^[12]利用半模基片集成波导, 使用相同的方法, 通过加载铁氧体实现频率调节; 将集成电容嵌入谐振腔中心, 通过改变 2 个谐振腔间的耦合系数来改变带宽, 实现中心频率固定, 带宽单独调谐。与基片集成波导相比, 减小了滤波器一半的体积, 如图 7 所示。

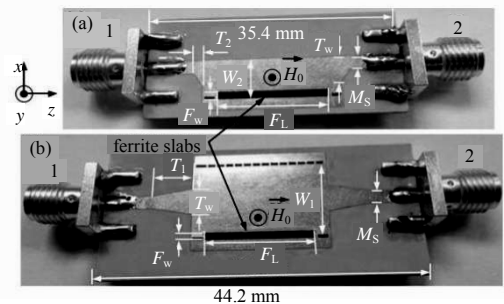


Fig.7 (a) Electromagnetic tunable HMSIW filter and (b) Electromagnetic tunable SIW filter
图 7 (a) 电磁可调 HMSIW 滤波器; (b) 电磁可调 SIW 滤波器

2018 年, 文献[13]设计了一款频率带宽可调的电磁二维可重构滤波器, 结构如图 8 所示。将可调电容嵌入 SIW 谐振腔中, 调节谐振腔的谐振频率; 在 SIW 滤波器耦合窗口处加载 YIG 铁氧体材料, 利用外加偏置磁场与 YIG 的磁电效应控制谐振腔之间的耦合强度来调整带宽大小; 通过在输入输出馈线上加载可调电容来控制外部品质因数, 从而保证

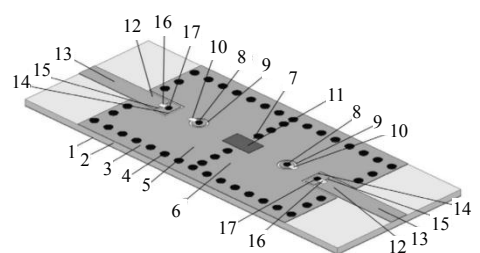


Fig.8 Frequency and bandwidth tunable electromagnetic filter
图 8 频率带宽可调的电磁滤波器

滤波器在频率和带宽变化时保持良好的性能。在性能稳定时，中心频率和带宽同时调谐，通带频率调谐范围为 6.15~10.75 GHz，达到 43%；其绝对带宽调谐范围为 51~360 MHz，对应相对带宽调节范围为 0.83%~3.35%，插入损耗在 0.56~0.66 dB 之间。

2 电磁二维可重构滤波器性能分析

2.1 磁可调器件和电可调器件混合结构的性能分析

铁氧体和变容二极管的混合可调结构研究较少，现有的均为和 SIW 相结合。与利用磁复合材料的电磁二维可重构滤波器相比，具有能实现中心频率和带宽同时可调的优势。调谐频率范围如表 1 所示，最大为 6.15~10.75 GHz。混合结构的滤波器种类较少，现有的设计中均为基片集成波导结构，调谐时还需外置偏压线圈，难以做到器件的小型化和集成化；且由于设计中的铁氧体材料是嵌入到基片集成波导缝隙中的，很难进行大规模生产。

表 1 混合结构电磁滤波器性能对比

reference	center frequency/GHz	insertion loss/dB	bandwidth/MHz	insertion loss/dB
[12]	10.8-11.95	1.7	340-580	1-2
[14]	8.14-10.97	0.9-1.1	181-375	0.62-1.10

2.2 利用磁电复合材料结构的性能分析

由表 2 可知，早期利用磁电复合材料的电磁二维可重构滤波器侧重于无损耗、调谐速度快的电可调部分，但电调谐频率范围，最大仅为 420 MHz。后来结合磁调谐宽范围的优势，利用磁场可实现粗调，一般在 10 GHz 以下；利用电场可实现细调，几十兆赫兹到几百兆不等，但插入损耗仍偏高，最小的也在 2 dB 左右，调谐仅限于中心频率，且结构较为单一，均为微带结构，限制了滤波器的性能。此外，磁调谐需外加偏置磁场，限制了滤波器的小型化。

利用磁电复合材料的电磁二维可重构滤波器的性能主要受滤波器自身的结构和磁电复合材料的特性影响。

表 2 利用磁电复合材料的电磁滤波器性能对比

reference	external bias magnetic field/Oe	center frequency/GHz	electric field/(kV/cm)	frequency shift/MHz	insertion loss/dB
[3]	/	/	0-30	420	2.5
[4]	/	/	0-3	125	5
[14]	600-2 700	3-10	0-8	45	/
[6]	50-250	1.5-2.4	0-8	200	< 2
[12]	100-400	3.78-5.27	0-4	220	1.73-3.42

2.2.1 滤波器结构的影响

电磁二维可重构滤波器的结构大部分为单谐振耦合微带结构，这种结构便于加载磁电复合材料，结构小，便于集成。只需找到性能优良的磁电复合材料，即可设计出需要的滤波器，但这种结构对磁电复合材料的依赖性太高，大大限制了磁电滤波器的发展。

部分学者通过改变微带耦合线的结构来提高滤波器的性能。文献[8]对比传统结构即单导带微带和蜿蜒微带结构，发现蜿蜒微带结构体积更小，更适合现代的通信系统，设计了一种蜿蜒微带结构的磁带阻滤波器。文献[7]将具有铁磁谐振特性的 YIG 薄膜作为谐振器，耦合到 T 型耦合微带结构。这种 T 型结构滤波器的最小插入损耗小于 2 dB，而同等条件下平行结构的最小插入损耗为 10 dB，L 型结构的最小插入损耗为 5 dB，T 型结构从一定程度上改善了插入损耗。此外，有学者在单加载腔微带结构上增加一个调谐腔，设计为双加载腔微带结构。2012 年，朱锋杰^[15]在文献[4]滤波器(图 2)的基础上，在耦合微带线之间加载两块平行 PZT/YIG 磁电层合材料，构成一款电磁二维可重构双通带滤波器，如图 9 所示。电可调可实现几十赫兹的精确调谐，外加偏置磁场可实现 2~10 GHz 的粗调谐。其中带通部分插入损耗仅为 3 dB，阻带部分的最大插入损耗为 20 dB。通过改变两块材

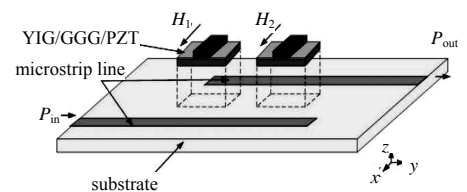


Fig.9 Electromagnetic double bandpass filter
图 9 电磁双通带滤波器

料上的偏置磁场大小, 该滤波器还可以实现向单通带的转化, 增加了可调的灵活性。

2.2.2 磁电层合材料种类的影响

早期磁电复合材料的磁电转换系数较低, 不具备任何应用价值, 2001 年, RYU^[16]使用两层伸缩材料 Terfenol 夹一层压电材料 PZT 得到了较大的磁电转换系数, 使磁电复合材料具备应用价值; 同时薄膜制备技术的发展, 促进了磁电复合材料的发展, 使得越来越多的材料出现。但实际用于电磁二维可重构滤波器的磁电复合材料并不多, 主要有钇铁石榴石铁氧体(YIG)、锂铈铁氧体(LZFO)、单晶 Y 型六角铁氧体(Zn_2Y)、镍锌铁氧体(NiZn)、锆钛酸铅(PZT)、铌酸铅镁钛酸铅(PMN-PT)等。材料之间的相互复合, 如 YIG/PZT, YIG/PMN-PT, Zn_2Y /PMN-PT, 对滤波器的调谐范围的大小有很大的影响。

文献[6]研究 LZFO/PZT 和 YIG/PZT 的微波磁电耦合效应, 同等条件下, LZFO/PZT 层合结构的磁电耦合常数 $A=0.25$ Oe/(kV/cm), 而 YIG/PZT 的磁电耦合常数 $A=0.98$ Oe/(kV/cm), 后者是前者的 4 倍。YIG 层共振线宽大, 且微波损耗更小, 因此 YIG 更适用于磁电微波器件。2012 年, TATARENKO^[17-18]通过分析新型磁电复合材料六角铁氧体/压电层合材料 Zn_2Y /PZT 和 Zn_2Y /PMN-PT 的磁调谐和电调谐性质, 发现通过外加偏置磁场(0.2~2.5 kOe)在 Zn_2Y 上, 可实现 8~25 GHz 的磁调谐; 施加电场在压电层, PZT 的磁电耦合常数 $A=1.2$ Oe/(kV/cm), PMN-PT 的磁电耦合常数 $A=10$ Oe/(kV/cm)。这为设计调谐范围更大的电磁二维可重构滤波器提供了基础。

文献[19]、文献[17]、文献[10]分别以 YIG/PMN-PT, Zn_2Y /PMN-PT, NiZn/PMN-PT 设计了耦合微带线结构的电磁二维可重构滤波器, 滤波器的参数见表 3。由表 3 可知, Zn_2Y /PMN-PT 的调谐范围最大为 8~25 GHz, 而 YIG/PMN-PT 和 NiZn/PMN-PT 均在 10 GHz 以下。从外加偏置磁场的大小来看, NiZn/PMN-PT 的功耗最小; 电调谐 NiZn/PMN-PT 施加 0~4 kV/cm 的电场可获得 220 MHz 的宽范围调谐。

表 3 不同铁氧体磁电层复合材料滤波器性能对比

Table 3 Performance comparison of different ferrite magnetoelectric composite filters

materials	external bias magnetic field/kOe	center frequency/GHz	electric field/kV/cm	frequency shift/MHz
YIG/PMN-PT	0.6-2.7	3-10	0-8	45
Zn_2Y /PMN-PT	0.2-2.5	8-25	0-12	120
NiZn/PMN-PT	0.1-0.4	3.78-5.27	0-4	220

电磁二维可重构滤波器的电调材料大多为锆钛酸铅(PZT)和铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)。文献[16]施加电场在压电层, 得到 PZT 的磁电耦合常数 $A=1.2$ Oe/(kV/cm), PMN-PT 的磁电耦合常数 $A=10$ Oe/(kV/cm)。PMN-PT 材料比 PZT 高出一个数量级, 在相同的电压下, PMN-PT 材料电调谐范围较大, 而 PZT 材料的调谐范围则较小。

为了降低磁调谐功耗, 与常用的低饱和度的钇铁石榴石铁氧体相比, 文献[20]采用磁致伸缩系数更大的镍铁氧体 $NiFe_2O_4$; 为使电调具有较大的调谐范围, 电调材料采用具有更大压电系数的 PMN-PT。该滤波器以 $NiFe_2O_4$ /PMN-PT 复合材料为基底, 微带线采用三级发夹结构, 如图 10 所示。在小于 150 Oe 的偏置磁场下, 具有 5.7%的可调范围, 电场可调范围可达 270 MHz(2.1%)。与 NiZn/PMN-PT 相比, 磁调范围略有减小, 不到 1 GHz, 电调范围增大 50 MHz, 但插入损耗不理想, 最小高达 5.2 dB。

除了以上原因, 磁电复合材料物理尺寸也对频率的偏移有一定的影响^[21-23]。文献[22]以 T 型耦合滤波器为对象, 保持磁电复合材料板长、宽、厚度其中两项不变, 只改变一项进行测试。测试发现, 谐振频率都会有小幅度偏移: 当宽度增加时, 插入损耗会变大, 带宽会变窄; 当长度增加时, 插入损耗会变小, 带宽小幅度增加; 当厚度变化时, 带宽和插损几乎保持不变, 仅仅是频率的偏移。

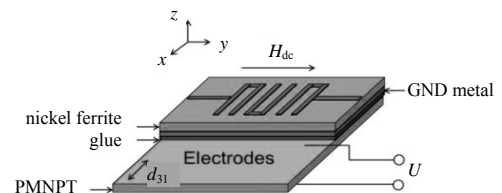


Fig. 10 $NiFe_2O_4$ /PMN-PT electromagnetic filter
图 10 $NiFe_2O_4$ /PMN-PT 电磁滤波器

3 总结与展望

电磁二维可重构滤波器自提出以来, 由于其兼备“磁可调和电可调的优点”, 吸引了众多射频领域学者的兴趣, 逐渐成为工业尤其是军工关注的热点。但仍存在许多不足: a) 电磁二维可重构滤波器的理论研究还不够深入, 实现方式比较单一, 主要靠磁电复合材料; b) 电磁二维可重构滤波器的性能还比较有限, 大多仅能满足单一的可调性能, 如带宽或中心频率可调, 不能满足“全可调”模式, 且损耗依然较大; c) 电磁二维可重构滤波器目前主要还是传统的微带线结构, 结构单一; d) 提供磁调谐偏置磁场的一般为体积大且笨重的电磁铁线圈, 导致滤

波器难以集成小型化。

针对上述问题,将基片集成波导小型化和谐振腔的高品质特性以及低温共烧陶瓷技术质量轻、损耗低、大规模制造成本低的特点与电磁二维可重构滤波器结合起来,开发出在性能和小型化方面更具优势的电磁二维可重构滤波器,具有巨大的应用前景。

参考文献:

- [1] 高雅,王璐. 可调微波滤波器专利分析[J]. 中国科技信息, 2019(12):29-30. (GAO Ya,WANG Lu. Patent analysis of the tunable microwave filter[J]. China Science and Technology Information, 2019(12):29-30.)
- [2] 朱锋杰. 耦合带磁电可调滤波器的等效电路建模及器件设计[D]. 杭州:中国计量学院, 2014. (ZHU Fengjie. The lumped equivalent circuit research of magnetoelectric tunable couple microstrip filter and microwave device design[D]. Hangzhou,Zhejiang,China:China Jiliang University, 2014.)
- [3] SRINIVASAN G,TATARENKO A S,BICHURIN M I. Electrically tunable microwave filters based on ferromagnetic resonance in ferrite-ferroelectric bilayers[J]. Electronics Letters, 2005,41(10):596-598.
- [4] TATARENKO A S,GHEEVARUGHESE V,SRINIVASAN G. Magnetolectric microwave bandpass filter[J]. Electronics Letters, 2006,42(9):540-541.
- [5] 宣立明. 多铁材料多场耦合理论及在微波滤波器中的应用[D]. 杭州:中国计量学院, 2012. (XUAN Liming. The multi-field coupling mechanism of multiferroic material and application in microwave filter[D]. Hangzhou,Zhejiang,China:China Jiliang University, 2012.)
- [6] TATARENKO A S,GHEEVARUGHESE V,SRINIVASAN G,et al. Microwave magnetoelectric effects in ferrite-piezoelectric composites and dual electric and magnetic field tunable filters[J]. Journal of Electroceramics, 2010,24(1):5-9.
- [7] YANG G M,LOU J,WU J,et al. Dual H-and E-field tunable multiferroic bandpass filters with yttrium iron garnet film[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore,MD,USA:IEEE, 2011:1-4.
- [8] XUAN L M,ZHOU H M,LI F. Design of dual-stop-band microwave filter based on the magnetoelectric composite[C]// 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery(FSKD). Shanghai,China:IEEE, 2011:2263-2266.
- [9] ZHOU H M,ZHU F J,LI C,et al. Ferrite-piezoelectric layered composite materials for magnetoelectric tunable dual-band bandpass filter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(303):1793-1797.
- [10] LIN H,WU J,YANG X,et al. Integrated non-reciprocal dual H-and E-Field tunable bandpass filter with ultra-wideband isolation[C]// 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix,AZ,USA:IEEE, 2015:1-4.
- [11] ADHIKARI S,GHIOTTO A,WU K. Simultaneous electric and magnetic two-dimensionally tuned parameter-agile SIW devices[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,61(1):423-435.
- [12] ADHIKARI S,HEMOUR S,GHIOTTO A,et al. Magnetically tunable ferrite-loaded half-mode substrate integrated waveguide[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2015,25(3):172-174.
- [13] 张巧利,王秉中. 一种频率带宽可调的电磁二维可重构滤波器:中国,201810681149.9[P]. 2018-11-13. (ZHANG Qiaoli, WANG Bingzhong. An electromagnetic two-dimensional reconfigurable filter with tunable frequency and bandwidth: China,201810681149.9[P]. 2018-11-13.)
- [14] 廉靖. 基于双层磁电结构多功能微波器件设计及等效电路研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2015. (LIAN Jing. The multifunctional microwave device design and equivalent circuit based on double layered magnetoelectric structure[D]. Hangzhou,Zhejiang,China:China Jiliang University, 2015.)
- [15] 朱锋杰,周浩森,肖英,等. 一种磁电可调双通带滤波器[J]. 杭州电子科技大学学报, 2012,32(5):17-20. (ZHU Fengjie, ZHOU Haomiao,XIAO Ying,et al. A magnetoelectric tunable double pass band filter[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2012,32(5):17-20.)
- [16] JUNGHO R,VAZQUEZ C A,KENJI U,et al. Magnetolectric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001,40(8):4948-4951.
- [17] TATARENKO A S,MURTHY D V B,SRINIVASAN G. Hexagonal ferrite-piezoelectric composites for dual magnetic and electric field tunable 8-25 GHz microstrip line resonators and phase shifters[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012,54(5):1215-1218.
- [18] TATARENKO A S,BICHURIN M I. Electrically tunable resonator for microwave applications based on hexaferrite-piezoelectric layered structure[C]// 21st International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol,Ukraine:IEEE, 2011.

- [19] USTINOV A B,SRINIVASAN G,FETISOV Y K. Microwave resonators based on single-crystal yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate layered structures[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(6):063901.
- [20] YANG X,GAO Y,WU J,et al. Dual H- and E-field tunable multiferroic bandpass filter at Ku-band using partially magnetized spinel ferrites[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013,49(11):5485-5488.
- [21] ZHOU H M,XIA Z L,DENG J H. The research of dual-tunable magnetoelectric microwave filters:numerical simulation of the magnetoelectric microwave filters based on theoretical model of electric tuning ferromagnetic resonance[C]// 2011 Third International Conference on Communications and Mobile Computing. Qingdao,Shandong,China:IEEE, 2011:258-261.
- [22] ZHOU H M,ZHANG Q S,LIAN J,et al. A lumped equivalent circuit model for symmetrical T-shaped microstrip magneto-electric tunable microwave filters[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016,52(10): 1-9.
- [23] 傅子豪,王振,刘宇鹏,等. 基于液晶材料的带宽可重构毫米波滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(1): 95-98. (FU Zihao,WANG Zhen,LIU Yupeng,et al. Bandwidth reconfigurable millimeter wave filter based on liquid crystal[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(1):95-98.)

作者简介：

赵贺锋(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频器件.email:120829425@qq.com.

朱永忠(1980-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场数值计算、天线与滤波器设计.

江川(1987-), 男, 讲师, 主要研究方向为军事通信网络等.

周余昂(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波天线.

(上接第 888 页)

- [2] NAKANNO H,TAKADA H,KITAMURA Y,et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1992,40(3):279-284.
- [3] 赵东贺,牛传峰,孙良. 一种低剖面螺旋阵列天线设计[J]. 河北省科学院学报, 2017,34(2):79-83. (ZHAO Donghe,NIU Chuanfeng,SUN Liang. Design of a low profile helical antenna array[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2017, 34(2):79-83.)
- [4] LI Xiangqiang,LIU Qingxiang,WU Xiaojiang,et al. A GW level high power radial line helical array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagations, 2008,56(9):2943-2948.
- [5] LI Xiangqiang,LIU Qingxiang,ZHAO Liu,et al. The high-power radial line helical array antenna[C]// 2008 World Automation Congress. Waikoloa,HI,USA:IEEE, 2008:145-149.
- [6] 赵玮琛. L波段多单元扁波导阵列天线馈电系统设计[D]. 成都:西南交通大学, 2018. (ZHAO Weichen. Design on the feed system of L-band multi-unit slab waveguide array antenna[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University of China, 2018.)
- [7] KRAUS J D,MARHEFKA R J. Antenna:for all application[M]. New York:McGraw-Hill, 2002.
- [8] LI Xiangqiang,LIU Qingxiang,ZHAO Liu,et al. 16-element single-layer rectangular radial line helical array antenna for high-power applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9):708-711.
- [9] NAKANO H. Extremely low-profile helix radiating a circularly polarized wave[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991,39(6):754-756.

作者简介：

鄂蕴纲(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波车地通信小型化阵列天线. email:eyg0416@163.com.

李相强(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线理论与技术、电磁检测技术、电磁兼容技术.