

文章编号: 1001-4322(2007)02-0280-04

新型高性能光控高温超导微波可变衰减器研制*

刘娟秀¹, 羊 恺¹, 刘 霖², 补世荣¹, 段杏娜¹, 罗正祥¹, 叶玉堂²

(1. 电子科技大学 电子工程学院 微波中心, 成都 610054; 2. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘 要: 提出了一种用于高温超导系统的新型星载光控高温超导微波可变衰减器, 详细介绍了设计过程, 并针对测试结果进行了分析。该衰减器的实质是利用液氮温区高温超导薄膜极低的微波表面电阻和卓越的激光响应特性, 实现优良的衰减功能。在器件结构的设计上引入过渡材料和透明有机材料以保证器件良好的接地性能以及激光光束的对准。主要结论如下: 光控高温超导微波可变衰减器在液氮温区工作, 电路尺寸为 12 mm × 8 mm × 0.5 mm, 可单独使用也可集成于高温超导系统中, 可大幅减小系统的体积与质量, 高温超导衰减器的插损小于 0.2 dB, 比常规衰减器低 1 个量级, 高温超导衰减器的可变衰减步进值小于 0.01 dB, 比常规衰减器低 1~2 个量级。根据激光功率大小对衰减器插损变化特性的影响, 该衰减器也可以实现步进式调谐。

关键词: 高温超导微波衰减器; 光控; 插损

中图分类号: TN715 **文献标识码:** A

性能优异的星载高温超导系统在卫星通信、航空航天等领域发挥着日趋重要的作用^[1,2], 而衰减器作为卫星通信系统中的重要组件^[3], 在平稳信号、提高接收和发射信号质量、消除气象及其它条件的影响等方面也具有重要作用^[4]。所以, 插损小、衰减精度高、在液氮温区工作并可与超导系统集成于一体的衰减器对于星载高温超导系统来说尤为重要^[5]。但现有衰减器的插损、衰减步进与超导系统的噪声和灵敏度相比, 高出 1~2 个数量级^[6], 使高温超导系统的优越性能无法完全显现, 且现有衰减器均无法在液氮温区工作^[7], 难以实现与高温超导系统的有效集成, 严重阻碍了高温超导系统在卫星通信上的应用。

本文提出一种新型的光控高温超导微波可变衰减器, 其实质是利用液氮温区 YBCO 高温超导薄膜极低的微波表面电阻^[8] (按不同频段, 比常规金属铜材料小 1~5 个量级) 和卓越的激光响应特性^[9] (能隙宽度在一般半导体光电材料的 1% 以下)。在 0~20 GHz 频率范围内, 其插损小于 0.2 dB, 可调衰减步进小于 0.01 dB。由于其在液氮温区工作, 环境与高温超导系统完全相同, 故可集成在高温超导系统中, 在实现优越衰减性能的同时, 大幅减小系统体积。

1 光控高温超导微波可变衰减器设计与测试

光控高温超导微波可调衰减器的结构设计如图 1 所示, 主要由盒主体(1)、射频 SMA 接头(2)、高温超导电路(3)、盖板(4)和光纤输出端(5)等构成。其中, 考虑到材料的热传导性以及与高温超导电路衬底热膨胀系数的匹配性, 屏蔽盒主体采用的材料为金属铜, 将高温超导电路安装于主体盒中, 俯视图如图 1(a)所示, 并在电路背面与主体盒之间放置一种导电性能良好的过渡材料, 以保证高温超导微带电路背面良好接地。盖板采用可在液氮温区使用的透明有机玻璃材料, 可以方便地实现激光器光束与高温超导微带电路的对准, 其中心留有匹配激光光纤头的小孔, 激光通过光纤输出, 辐照在微带线上, 固定后完成整个光控高温超导微波可变衰减器的制作, 最终实物正视图如图 1(b)所示。从结构设计看, 该衰减器具有以下主要优点:

(1) 体积小。电路基片尺寸只有 12 mm × 8 mm × 0.5 mm, 可集成在超导系统中, 也可采用密封盒封装的形式单独使用。

(2) 结构简单, 可方便组装。将器件设计为可组装的各个部件, 部件的连接采用过渡材料, 简化了衰减器的结构。需要改变该衰减器的性能参数时, 只需更换 YBCO 高温超导电路基片或者改变辐照激光特性。

图 1 所示的是在液氮环境中使用时的结构设计, 该衰减器与高温超导系统集成时, 因整套系统均处于真空、低温环境中, 完全满足光控高温超导微波可变衰减器的工作条件, 故不再需要比衰减器芯片大得多的密封

* 收稿日期 2006-06-28; 修订日期 2006-11-29

基金项目 国家自然科学基金资助课题(60277008), 国家 863 计划项目资助课题, 电子科大青年基金资助课题(JX05010)

作者简介 刘娟秀(1981—), 女(汉族), 江西赣州人, 博士生, 讲师, 主要从事高温超导材料激光化学与辐照特性及其应用研究, juanxiu@uestc.edu.cn.

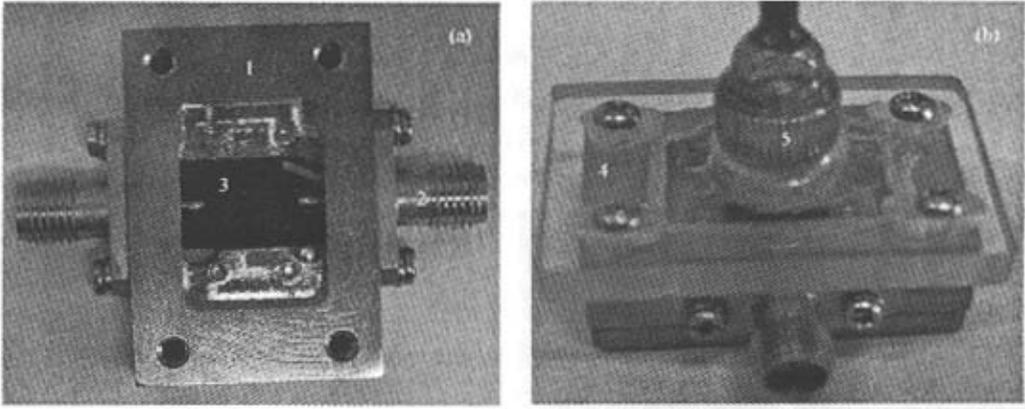


Fig. 1 Structure of laser-controlled HTS microwave attenuator

图 1 光控高温超导微波衰减器的封装结构

盒来保证器件的工作环境,只需保证微带电路背面良好接地以及与系统中其它器件的连接即可,可大大缩小衰减器所占空间和质量,再引入激光光束并辐照在微电路上,即可实现衰减器功能。可以看出,光控高温超导微波可变衰减器实际上是专为高温超导系统设计的一种新型衰减器,在与系统的集成应用中更显示出其独特的优势。

将该衰减器置于液氮环境中,通过矢量网络分析仪对其参数进行测试,如图 2 所示。矢量网络分析仪可以实时动态地观测到 0.05 ~ 20 GHz 频率范围内器件插损、驻波和相位等的变化情况。激光器采用波长为 0.68 μm 的连续光,可以实现从 0 ~ 40 mW 的功率调谐。激光通过光纤输出,辐照在密封盒内线宽为 0.4 mm 的 YBCO 高温超导微带线上,光纤端面距离微带线约为 1 mm,其光斑直径约 1 mm,可以完全覆盖微带线宽。

高温超导微带线对激光辐照的响应非常明显,国内外学者进行了大量研究,文献 [10] 也曾对其进行过报道^[10],其光响应隔离度可达到 60 dB 以上,响应时间小于 1 ms。本文对该参数不再重复报道,侧重报道该光控高温超导微波可变衰减器的插损和衰减精度两个对星载高温超导系统而言更为重要的测试结果。

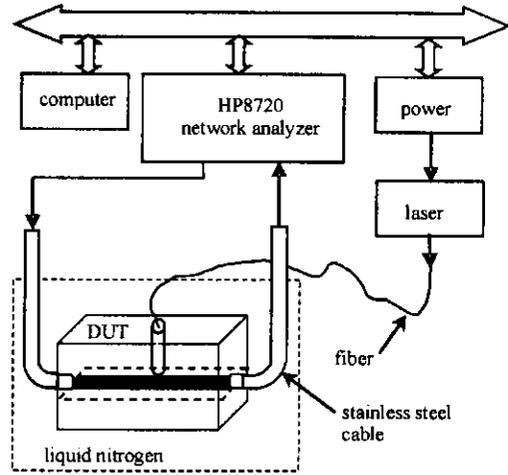


Fig. 2 Testing system of laser-controlled HTS microwave attenuator

图 2 光控高温超导微波衰减器测试系统框图

2 测试结果与讨论

2.1 插损

高温超导接收机前端系统的整体噪声一般小于 1 dB,而常规方法制作的单个衰减器损耗大于 1 dB。显然,如果在超导系统外使用常规衰减器,其卓越的性能很难显现出来。因此,具有极低插损并可与超导系统集成的衰减器具有重要的应用价值。

图 3 表示了光控高温超导微波可变衰减器插损的测试过程,纵轴为插损横轴为测试频率,从 0 ~ 20 GHz。在测试系统接入高温超导衰减器前,进行传输校准,使得插损在 0 dB 附近,如图 3 (a)所示;接入高温超导衰减器后(无激光辐照)插损增大,稳定之后的测试曲线如图 3 (b)所示,基本上小于 0.2 dB。

2.2 激光功率控制实现高灵敏度衰减量微调

本文的光控高温超导微波可变衰减器实质上属于连续可调衰减器,但根据未来发展趋势,数字式衰减器具有更加广阔的应用前景,而激光功率值可以根据电流数值实现良好的数字步进功能。所以,本文侧重其激光

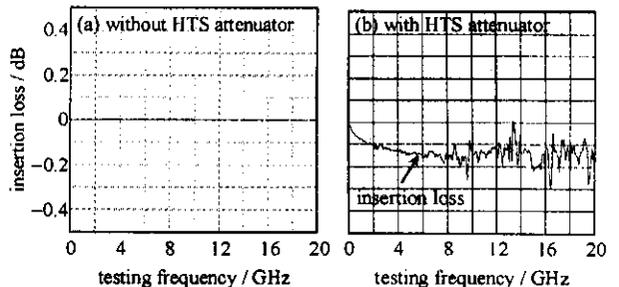


Fig. 3 Tested curve of insertion loss

图 3 高温超导衰减器接入系统前后的测试曲线

具有更加广阔的应用前景,而激光功率值可以根据电流数值实现良好的数字步进功能。所以,本文侧重其激光

辐照功率值变化时的插损变化特性。

通过实验,获得不同功率激光辐照下液氮温区光控高温超导微波可变衰减器插损的变化特性,如图 4 所示。矢量网络分析仪获得的光控高温超导微波可变衰减器插损,功率每步进 5mW,其插损变化值分别约为 0.01,0.01,0.01,0.02,0.01,0.02,0.01dB。可以看出,该光控高温超导微波可变衰减器可以很方便地实现步进小于 0.01 dB 的调谐。这与常规衰减器相比,降低了 1~2 个量级,对于卫星通信具有重要价值。

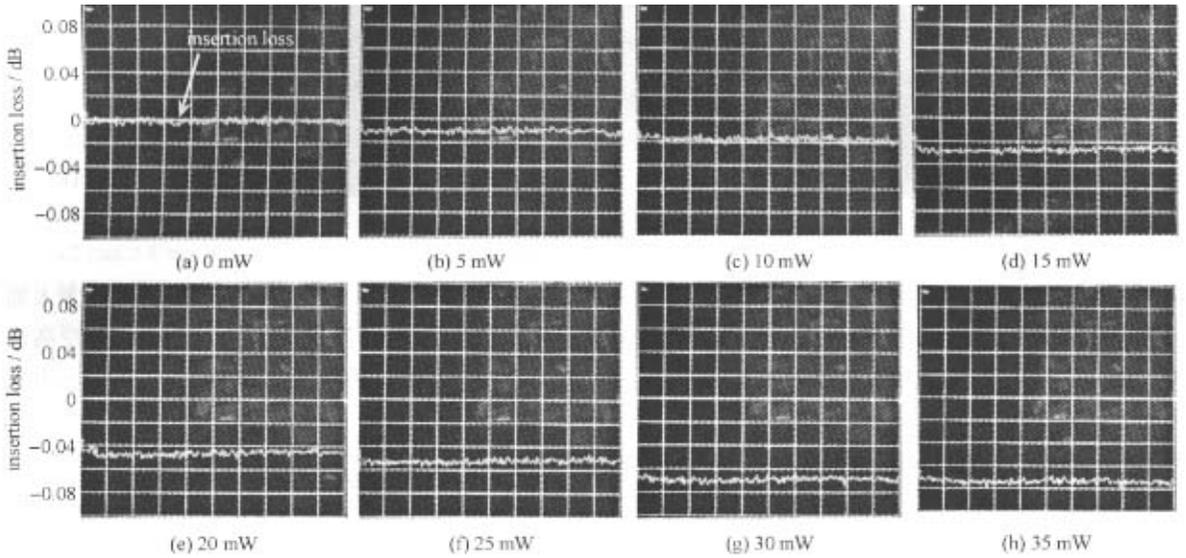


Fig. 4 Characteristics of insertion loss of HTS microwave variable attenuator versus laser power

图 4 液氮温区下光控高温超导微波可变衰减器插损随激光功率的变化特性

通过计算机处理,我们获得了插损随功率的变化曲线,如图 5 所示。可以看出,随着激光功率的增大,其插损的变化特性存在差异,据分析,这可能是由于 Kruse 效应造成的。Kruse 将这两种不同性质的光响应称为辐射热效应和非平衡光响应^[11],并从理论上进行了说明,如果响应与功率成正比,为热效应,反之,为光子效应。

实际上,我们的结果为 Kruse 观点提供了新的实验证明,并进一步认为:存在一个高温超导光-热响应功率阈值,该阈值将随 YBCO 膜厚、激光波长、温区等条件不同而发生变化。在本实验条件下,功率阈值约为 15 mW,当功率小于 15 mW 时,插损随功率表现为近似线性变化,该阶段以辐射热效应为主;当功率大于 15 mW 时,插损变化呈现较大的波动,出现非平衡光响应现象。

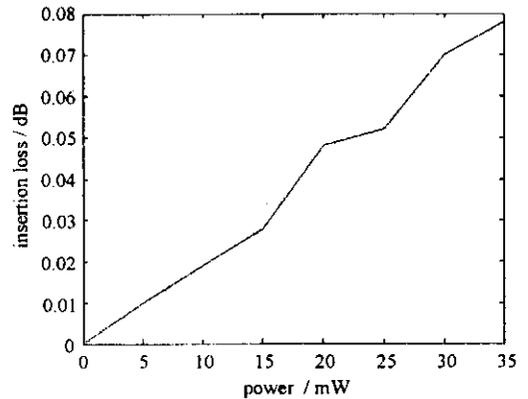


Fig. 5 Curve of insertion loss vs laser power

图 5 插损随激光功率变化曲线

3 结 论

利用液氮温区 YBCO 高温超导薄膜极低的微波表面电阻和卓越的激光响应特性,研制出具有较高性能的光控高温超导微波可变衰减器。本文研制的光控高温超导微波可变衰减器在液氮温区工作,电路尺寸为 12 mm×8 mm×0.5 mm,可集成在高温超导系统中,插损小于 0.2 dB,比常规衰减器低 1 个数量级,可衰减步进值小于 0.01 dB,比常规衰减器低 1~2 个量级,并且利用激光功率大小对高温超导衰减器插损变化特性的影响,也可以实现步进式调谐的工作方式,这对于星载高温超导系统的研制与应用具有重要价值。目前器件研制还处于初期,在以后的工作中,将进一步加强与高温超导滤波器、高温超导开关等的集成技术研究,并进一步提高光控高温超导微波可变衰减器的性能。

参考文献:

[1] Niu D C, Huang T W, Lee H J, et al. An X-band front-end module using HTS technique for a commercial dual mode radar[J]. *IEEE Trans Appl Su-*

percond ,2005 ,**15**(2) :1008-1011.

- [2] Wilson T L. A high-temperature superconductor energy-momentum control system for small satellites[J]. *IEEE Trans Appl Supercond* ,2003 ,**13**(2 II) :2287-2290.
- [3] Seaux J F ,Lascaux C ,Madrangas V. Interest of the superconductivity at 30 GHz :Application to the HTS preselect receive filters for satellite communications[J]. *IEEE MTT S Int Microwave Symp Dig* ,2004 ,**2** :1121-1124.
- [4] Sun K O ,Choi M K ,Van Weide D D. A PIN diode controlled variable attenuator using a 0 dB branch-line coupler[J]. *IEEE Microwave Compon Lett* ,2005 ,**15**(6) :440-442.
- [5] Soares E R ,Fuller J D ,Marozick P J. Applications of high-temperature-superconducting filters and cryo-electronics for satellite communication[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* ,2000 ,**48**(7 II) :1190-1198.
- [6] Sun K O ,Van Weide D D. Design of pin diode controlled variable attenuator using slow wave microstrip lines[J]. *Microwave Opt Technol Lett* ,2005 ,**47**(4) :323-327.
- [7] Saavedra C E ,Zheng Y. Ring-hybrid microwave voltage-variable attenuator using HFET transistors[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* ,2005 ,**53**(7) :2430-2433.
- [8] Raafat R M. Microwave superconductivity[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* ,2002 ,**50**(3) :750-759.
- [9] Kouzakov K A ,Berakdar J S. Photoinduced emission of cooper pairs from superconductors[J]. *Phys Rev Lett* ,2003 ,**91** :257007.
- [10] Eric Li ,Ogale S B ,Sharma R P ,et al. Temperature and laser power dependence of femtosecond optical pair-breaking rate in optimally doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial thin film[J]. *Phys Rev B* ,2004 ,**69** :134520.
- [11] Kruse P W. High T_c superconducting IR detectors[C]//Proc of SPIE. 1990 ,**1292** :108-177.

Development of laser-controlled high temperature superconducting microwave variable attenuator with low loss and attenuation step

LIU Juan-xiu¹ , YANG Kai¹ , LIU Lin² , BU Shi-rong¹ , DUAN Xing-na¹ , LUO Zheng-xiang¹ , YE Yu-tang²
 (1. School of Electronic Engineering ,University of Electronic Science and Technology of China ,Chengdu 610054 ,China ;
 2. School of Opto-Electronic Information ,University of Electronic Science and Technology of China ,Chengdu 610054 ,China)

Abstract : This paper proposes new a laser-controlled superconducting microwave variable attenuator which can be used in high-temperature superconducting(HTS) subsystem of satellites. The design process and experimental results are analyzed. Low microwave surface resistance and excellent laser response characteristics of HTS film are contributed to the favorable properties of this attenuator. A transition metal and a transparent material are adopted in the structure of HTS attenuator to ensure the grounded capability and the laser position on substrate. The results show that this attenuator ,which is 12 mm × 8 mm × 0.5 mm and works at low temperature ,can be used alone or integrated into HTS system to decrease system volume and weight. Insertion loss of this attenuator is about 0.2 dB ,whose magnitude is one order lower than that of a conventional attenuator. Attenuation step about 0.01 dB can be achieved ,which is 1 ~ 2 orders lower in magnitude than conventional attenuators . Also ,stepped attenuation can be realized according to the influence of laser power on the insertion loss change.

Key words : High-temperature superconducting microwave attenuator ; Laser-controlled ; Insertion loss