

# L 波段双频磁绝缘线振荡器的实验研究<sup>\*</sup>

陈代兵<sup>†</sup> 王 冬 范植开 孟凡宝 安海狮 龚海涛 秦 奋

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2008 年 9 月 19 日收到 2008 年 11 月 16 日收到修改稿)

根据角向分区产生双频率高功率微波( HPM )的设计思路, 开展了基于谐振腔深度角向分区模型的 L 波段双频磁绝缘线振荡器( BFMILO )的实验研究, 建立了 BFMILO 的实验系统和测量系统, 热测了 BFMILO 的辐射方向图, 通过辐射场功率密度积分得到了输出微波的功率. 在电子束电压约为 420 kV, 管电流约为 34 kA 的条件下, L 波段 BFMILO 输出的微波频率分别为 1.26 GHz 和 1.45 GHz, 对应的微波功率分别为 398 MW 和 222 MW. 并初步得到了谐振腔深度的角向分区比例不同的 BFMILO 的初步实验结果. 实验研究得到了稳定的双频率 HPM, 成功地研制出了 L 波段 BFMILO. 实验与理论研究的结果比较一致, 验证了 BFMILO 产生稳定的 HPM 的可行性, 为双频 HPM 器件研究探索出一个新方向.

关键词: 角向分区, 磁绝缘线振荡器( MILO ), 双频 MILO( BFMILO ), 高功率微波( HPM )

PACC: 2900, 4100, 4252

## 1. 引 言

至今, 在同一个高功率微波( HPM )器件中产生两个频率的微波信号的情况主要有: 1) 微波器件输出的中心频率和其二倍频信号, 但是这两个频率及其幅度相差太大, 二倍频可以忽略; 2) 主模和高次非对称模式的模式竞争出现的双频微波, 但器件处于“病态”工作, 功率效率很低; 3) 高频结构不合适而引起的频谱分岔, 或者工作频率不稳定导致功率效率通常很低; 4) 可调谐微波器件, 即通过机械调谐高频结构或者电调谐器件的工作参数, 使得器件在不同的参数条件下输出不同频率的微波信号, 但是仍然不能实现同时输出双频微波信号, 所以这些情况都不是有意识设计的双频 HPM 器件. 因此, 能够产生稳定输出的双频 HPM 器件是一个新兴的研究方向, 将具有重要的学术价值和潜在的实际应用<sup>[1-4]</sup>, 目前在国内外尚未见到真正意义的双频 HPM 器件实验方面的报道. 同时, 磁绝缘线振荡器( magnetically insulated transmission line oscillator, MILO )具有结构紧凑、重量轻、无外加磁场、并允许较高的外加电压和较高的输入功率等特点, 它是目前 HPM 器件研究的一个热点<sup>[5-14]</sup>. 为此, 作者创新性地提出了通过在旋

转对称的常规单频 MILO 内部利用角向分区来产生双频率 HPM 的设计思路, 文献[1-3]已经对双频磁绝缘线振荡器( bifrequency MILO, BFMILO )进行了粒子模拟研究, 并优化设计出了 BFMILO, 为 BFMILO 的原理性实验做好了准备. 本文主要根据优化设计的 L 波段 BFMILO 的结构参数, 进行加工并开展原理性的实验研究, 内容主要包括建立 BFMILO 的实验系统和测试系统, 介绍测试及标定方法; 通过实验, 热测 BFMILO 的辐射方向图, 得到辐射场微波的总功率; 并给出角向分区比例不同的多种 BFMILO 的初步实验结果.

## 2. BFMILO 的实验系统

BFMILO 的实验系统( 如图 1 所示 )主要包括电感储能脉冲功率调节系统, BFMILO 器件部分和测试系统.

电感储能脉冲功率调节系统的主要作用是给负载提供上升前沿陡峭的高电压脉冲. BFMILO 器件部分包括器件的二极管, 器件的高频结构和辐射天线, 该系统主要基于现有的 L 波段硬管磁绝缘线振荡器<sup>[5,6]</sup> 如图 2 所示. 其中, 二极管的绝缘子采用平面开槽结构, 二极管的屏蔽环采用双屏蔽环的半球形

\* 国家计划项目资助的课题.

† E-mail: turenure@sina.com.cn

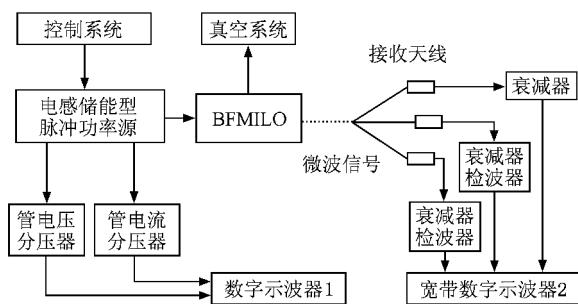


图1 实验系统的结构框图

结构,器件的阴极采用阶梯阴极的结构,器件的慢波结构的叶片数目为6,依次是前2片扼流片,中间3片互作用叶片,最后1片提取叶片,辐射天线采用圆锥喇叭天线。当电感储能脉冲功率调节系统给BFMILo的二极管提供了几百kV的负极性的高压脉冲时,在强电场的作用下,电子从阴极的侧面发射出来,其中一部分被收集极吸收,再经收集极与阳极之间的支撑杆流回阳极,这部分电子束流称为负载电流,其功能是产生一个围绕阴极的角向磁场,该磁场对慢波结构叶片下的电子束起磁绝缘作用。处于慢波结构叶片下的电子在阴阳极间的径向电场和角向磁场的共同作用下沿轴向漂移,当电子的漂移速度接近阳极慢波结构微波场的相速度时,电子束与场相互作用,电子束的能量转换为场的能量,产生HPM。通常每一个分区分别对应一个谐振频率,每一个分区独立工作从而产生双频率的HPM。HPM通过提取间隙传输到同轴线和后端的一体化辐射天线。

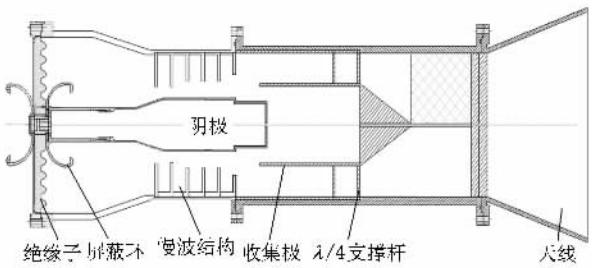


图2 BFMILo的结构示意图

### 3. BFMILo的测试系统和测试方法

BFMILo的测试系统主要包括电子束参数和微波参数测量系统。

利用水电阻分压器来测量二极管电压,采用罗果夫斯基(Rogowski)线圈测量二极管电流。对于微波

频率的测量,由接收天线直接把微波信号输入宽带数字示波器进行傅里叶变换(FFT)直接读取;或者由数字示波器进行数据采集,然后用数据分析软件进行频谱分析。对于微波功率的测量,目前公认的方法是辐射场的功率密度积分。但是,由于BFMILo的输出微波信号中同时包含了两个频率,因此设计了高性能的带通滤波器,将两个频率的微波信号分开,并分别测量两个频率的辐射方向图,根据热测的方向图进行辐射场功率密度的积分来分别计算两个频率的积分功率。由于实验室测试距离的限制,我们用BJ32开口波导天线作为带外接收天线来测量辐射场微波功率。

BFMILo的辐射场微波测试系统框图如图3所示。图中轴线方向定义为0°,在距BFMILo辐射天线4.1 m的水平面上放置4只BJ32开口波导接收天线,编号依次为1#,2#,3#和4#。1#接收天线放置在负的角度位置,2#接收天线放置在0°位置,3#接收天线放置在正的角度位置,4#接收天线用于监测每一发微波信号的微波频率。由于HPM源通常为单次脉冲,且每一发之间在峰值功率方面存在一定的差异,同时接收天线的数量有限,为了测量辐射天线的方向图并进行功率密度积分,因此需要测量多次才能得到足够的数据,为此,需要固定一个接收天线(本文选用2#天线),以便利用固定点的功率密度来进行功率密度的归一化。由于采用了BJ32开口波导作为带外接收的方式,所以对应于带外的主要信号频率而言,接收天线的有效面积非常小,与带内相比相差两个量级以上,而振荡器难以避免的二倍频微波信号正好在BJ32的带内,因此即使二倍频微波信号非常小,它也可以与主信号相当,所以需要采用低通滤波器将二倍频微波信号滤除。因此,测试信号的

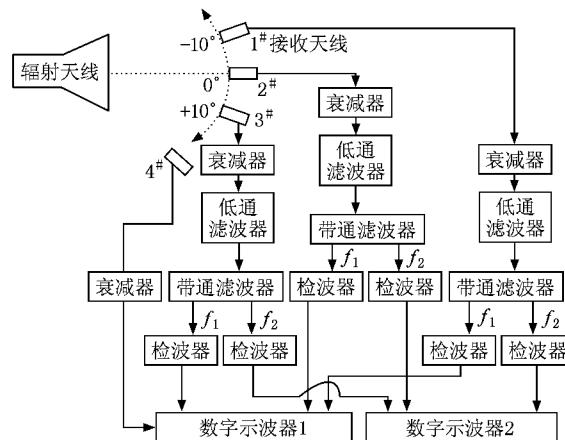


图3 BFMILo的辐射场测试系统框图

流程如下:将 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>接收天线接收的微波信号首先经过合适的衰减后,再通过低通滤波器(2 GHz 以下)进行滤波,并利用高性能的带通滤波器进行频率的选择,将频率  $f_1$ (1.26 GHz)和频率  $f_2$ (1.45 GHz)分

开,最后对不同频率的微波信号分别进行检波,并将检波信号分别输入到示波器。高性能的带通滤波器的结构示意图和照片如图 4 所示,其频率响应特性如图 5 所示。

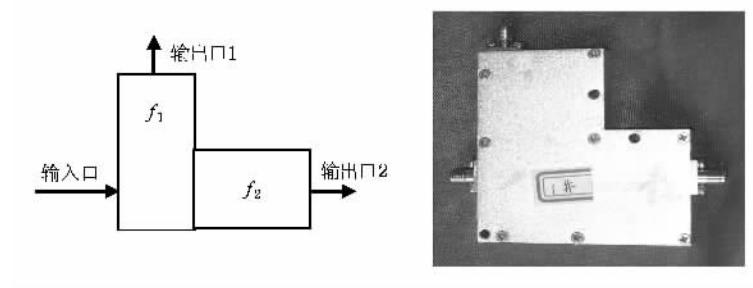


图 4 带通滤波器的结构示意图与照片

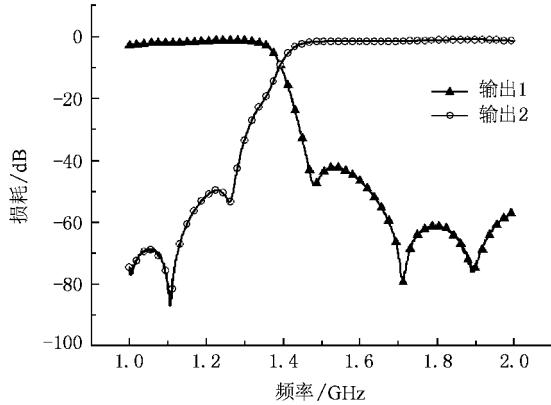


图 5 带通滤波器的频率响应特性

#### 4. BFMILo 的实验研究

在 L 波段硬管 MILO 装置的基础上,进行了 BFMILo 的热测实验,BFMILo 的实验系统结构如图 1 所示,实验装置图片如图 6 所示。其中,器件采用 6 个叶片,叶片的照片如图 7 所示,此时的谐振腔深度的角向分区比例为 1:1。测试的二极管电压、电流波形如图 8 所示,此时的电子束电压约为 420 kV,管电流约为 34 kA。

##### 4.1. E 面方向图的热测

辐射天线的电场为水平极化,在 E(水平)面内进行辐射场微波信号的监测,测试辐射天线的 E 面方向图。此时的 E 面方向图为  $\varphi = 0^\circ$  或  $360^\circ$ ,该方向图不对称。

将频率分离后的微波信号经过检波,得到了辐

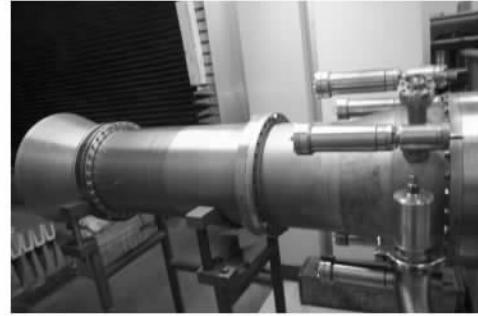


图 6 实验装置的照片



图 7 用于实验的 BFMILo 的叶片照片

射场不同角度( $10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$ )的微波信号的检波包络,频率为 1.26 GHz 的微波检波包络如图 9 所示,其中通道 2 对应辐射场  $10^\circ$ 位置的微波,通道 3 对应辐射场  $0^\circ$ 位置的微波,通道 4 对应辐射场  $-10^\circ$ 位置的微波。通道 1(图中未显示出来)用于监测  $20^\circ$ 位置的辐射微波的频率。通道 1 的傅里叶变换(FFT)中除了主信号频率为 1.26 GHz 和 1.45 GHz 外,还有类似模拟中出现的差频,这也正好符合粒子模拟的结果,但是由于示波器通道 1 设定了带宽限制,所以没有

观察到和频等混频信号.并且还得到了经过检波后的输出微波脉宽(半高宽)大于26 ns.利用信号处理软件将通道1接收到的信号进行频率的分离和频谱分析,可以得到如图10和图11所示的结果.从图中可以得到,经过信号处理软件得到的频谱与示波器通道1的FFT结果比较一致,1.45 GHz的微波信号的起振晚于频率为1.26 GHz的微波信号.

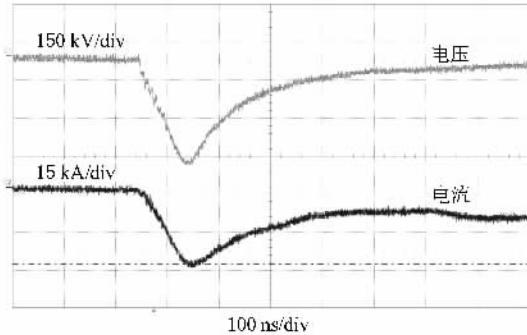


图8 二极管电压、电流波形

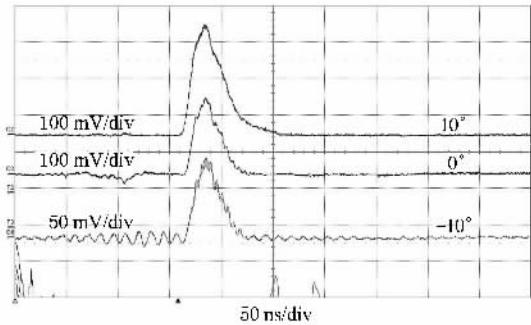


图9 频率为1.26 GHz的辐射场不同角度的微波检波包络

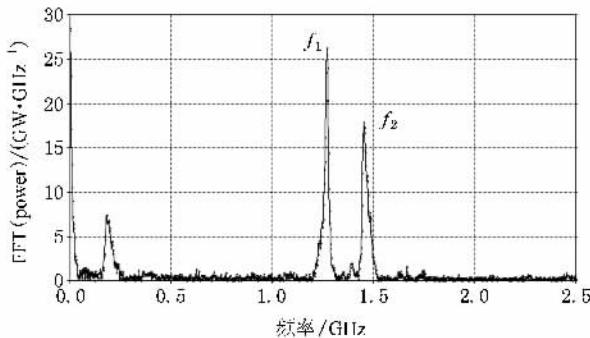


图10 20°位置的微波信号的频谱

频率为1.45 GHz的微波检波包络如图12所示,其中通道1对应辐射场10°位置的微波,通道2对应辐射场0°位置的微波,通道3对应辐射场-10°位置的微波.从图可以得出输出微波脉宽(半高

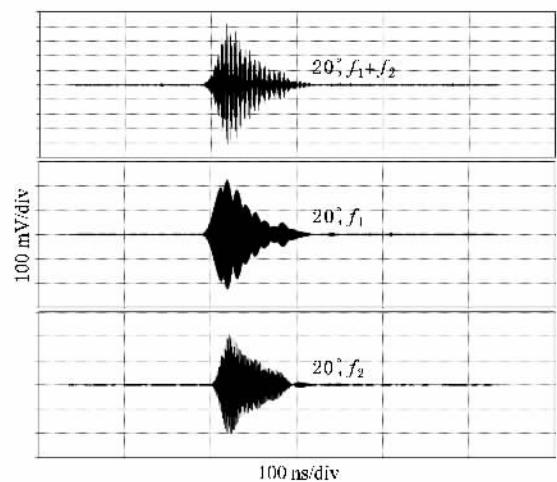


图11 频率分离后的20°位置的微波波形

宽)约为40 ns,该脉宽比频率为1.26 GHz的脉宽大14 ns.

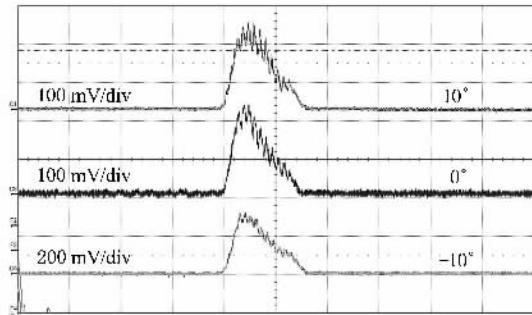


图12 频率为1.45 GHz的辐射场不同角度的微波检波包络

以0°位置的功率密度为标准进行功率密度的归一化,得到频率为1.26 GHz的归一化方向图,如图13(a)所示,图中离散的点是实验测试数据,实线为理论计算的结果,可以看出两组数据比较符合.而频率为1.45 GHz的归一化方向图如图13(b)所示,图中离散的点是实验测试数据,实线为理论数值计算的结果,可以看出两组数据的趋势比较一致.

#### 4.2. H面方向图的热测

将器件的叶片整体旋转90°,辐射天线的电场为垂直极化,为了便于测试,在H(水平)面内进行辐射场微波信号的监测.此时的H面方向图为 $\theta=90^\circ$ ,从图13可知该方向图不是最大增益的H面方向图.仍以0°位置的功率密度为标准进行功率密度的归一化,得到频率为1.26 GHz的归一化方向图,如图14(a)所示,图中离散的点是实验测试数据,实线为理论数值

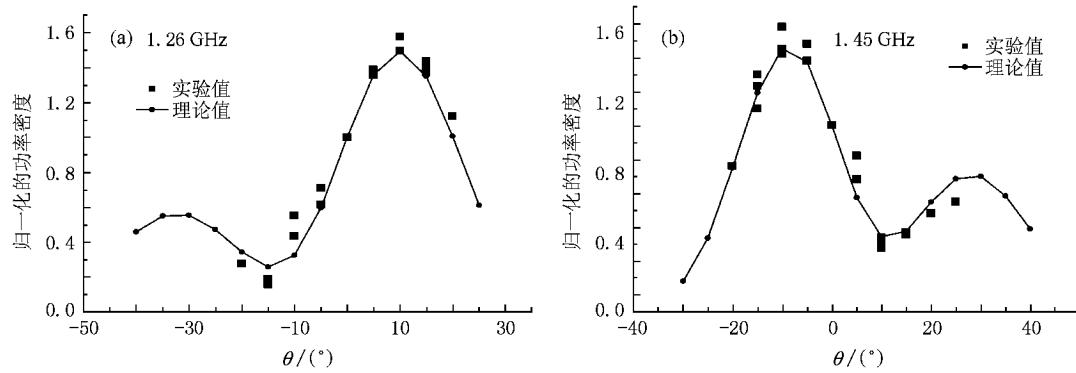


图 13 辐射天线的 E 面方向图

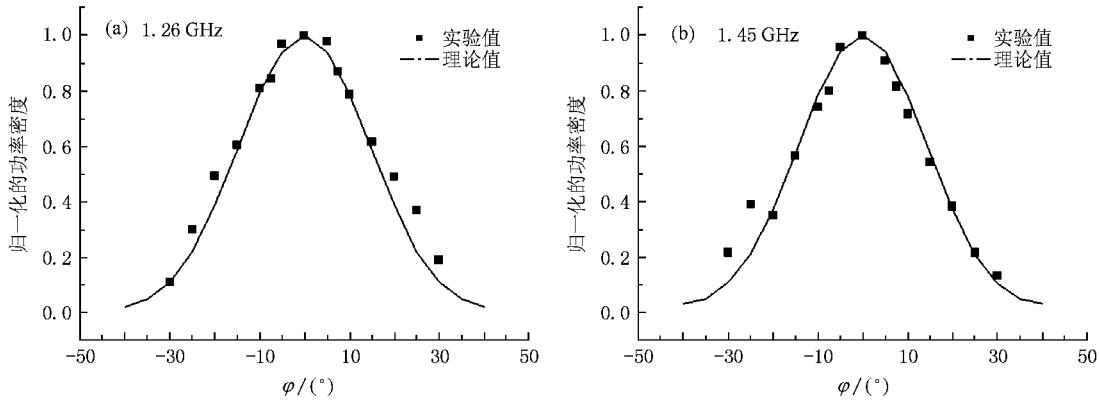


图 14 辐射天线的 E 面方向图

计算的结果,可以看出两组数据比较符合.而频率为 1.45 GHz 时的归一化方向图如图 14(b)所示,图中离散的点是实验测试数据,实线为理论数值计算的结果,可以看出两组数据的趋势比较一致.

由于实验测试得到的 H 面方向图不是最大功率密度所在的平面,积分功率不准确,所以需要根据 BFMILo 辐射天线的 E 面方向图来进行功率的计算.对于频率 1.26 GHz,最大功率密度的角度为 10° 左右,以该位置为中心进行功率积分,可以得到该频率的功率为 398 MW;对于频率 1.45 GHz,最大功率密度的角度为 -10° 左右,以该位置为中心进行功率积分,可以得到该频率的功率为 222 MW.

因此,在同一发实验中,在注入电压约为 420 kV,电流约为 34 kA 的条件下,BFMILo 输出的微波频率分别为 1.26 GHz 和 1.45 GHz,对应的微波功率分别为 398 MW 和 222 MW.

与粒子模拟的结果比较可以看出,实验结果尤其是输出微波总功率及功率效率方面与数值模拟结果还存在较大的差别,可能的原因一方面是由于脉

冲功率源的注入电功率不高,导致器件输出的微波总功率不高,并且还由于电压不高而致使器件的效率较低;另一方面最主要的原因是利用了现有的辐射天线,其反射系数太大,尤其是对第二个频率(1.45 GHz),这就使得腔内的微波功率难以辐射出去,并扰乱了微波信号的起振与束-波互作用,这也正是 1.26 GHz 的微波信号幅度比 1.45 GHz 的微波信号幅度大约 2.5 dB 的原因,也是频率为 1.45 GHz 的微波信号的起振晚于频率为 1.26 GHz 的微波信号,且前者的微波脉宽明显大于后者的原因;另外,叶片的安装精度不高也可能是原因之一.

#### 4.3. 角向分区比例不同的 BFMILo 的实验结果

在此之前,我们研究的 BFMILo 都是指谐振腔深度的角向分区比例为 1:1,即两种不同深度的谐振腔各占 180°,为了比较谐振腔深度的分区比例不同的 BFMILo 的实验结果,因此还进行了 2 种无角向分区(角向均匀,对应于 BFMILo 的两种谐振腔深度  $r_{o1}$  和  $r_{o2}$ ,且  $r_{o1} > r_{o2}$ ),以及分区比例分别为 1:2,

1:3共4种结构的MILO的实验。研究的主要内容是研究输出微波的波形、频率频谱以及接收到的微波信号中两个频率成分的比例关系等，并未进行输出微波功率的标定。

#### 4.3.1. 谐振腔深度无角向分区

当谐振腔深度无角向分区，且  $r_{o1} = r_{o2} = r_o =$

140 mm 时，此时为单频率 MILO，辐射场不同角度测量的输出微波、其频谱和检波波形如图 15(a)所示，此时的输出微波的频率为 1.21 GHz。而当  $r_{o1} = r_{o2} = r_o = 129$  mm 时，此时也为单频率 MILO，辐射场不同角度测量的输出微波、其频谱和检波波形如图 15(b)所示，此时的输出微波的频率为 1.40 GHz。

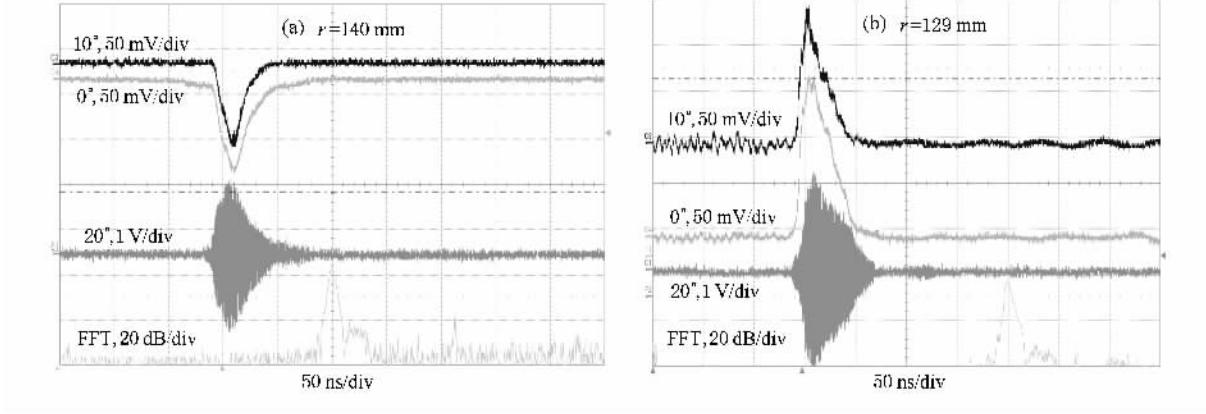


图 15 输出微波、其检波波形及其频谱

#### 4.3.2. 谐振腔深度角向分区比例 1:2

当谐振腔深度的角向分区比例为 1:2 时，即  $r_{o1} = 140$  mm 对应的弧长为  $120^\circ$ ，而  $r_{o2} = 129$  mm 对应的弧长为  $240^\circ$ 。BFMILO 的叶片照片如图 16 所示。辐射场不同角度测量的输出微波、其频谱和检波波形如图 17 所示，此时输出的双频微波的频率分别为 1.29 GHz 和 1.45 GHz（如图 18 所示），辐射场  $20^\circ$  位置的接收天线监测的微波信号未检波，在假设针对两个频率的天线有效接收面积和衰减量相等的条件下，两个频率的信号幅度比例相差约 2.7 dB，1.45 GHz 频率的幅度强于 1.29 GHz 频率的幅度。



图 16 角向分区比例为 1:2 的叶片照片

#### 4.3.3. 谐振腔深度角向分区比例 1:3

当谐振腔深度的角向分区比例为 1:3 时，即  $r_{o1} = 140$  mm 对应的弧长为  $90^\circ$ ，而  $r_{o2} = 129$  mm 对应的弧长为  $270^\circ$ 。BFMILO 的叶片照片如图 19 所示。辐射

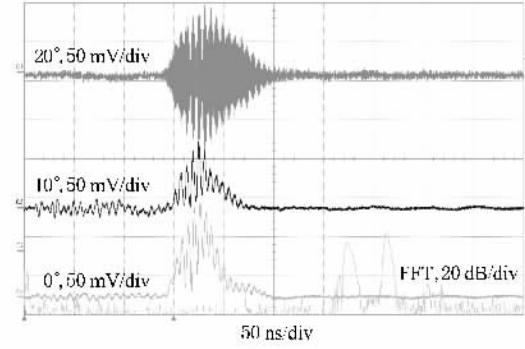
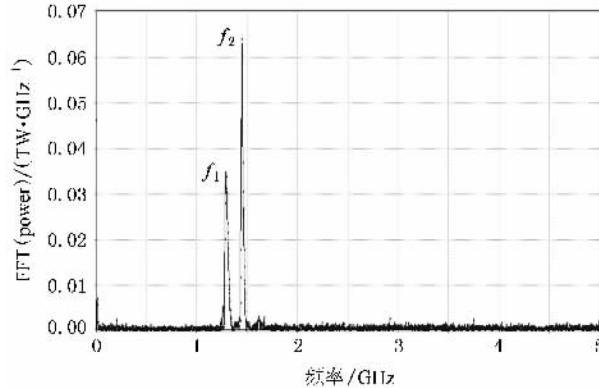


图 17 辐射场测量的双频率微波信号(检波)



场不同角度测量的输出微波、其频谱和检波波形如图 20 所示，此时输出的双频微波的频率分别为 1.32

图 18  $20^\circ$  位置的微波信号的频谱

GHz 和 1.45 GHz (如图 21 所示), 辐射场 20°位置的接收天线监测的微波信号未检波, 在假设针对两个频率的天线有效接收面积和衰减量相等的条件下, 两个频率的信号幅度比例相差约 4.5 dB, 1.45 GHz 频率的幅度强于 1.32 GHz 频率的幅度.



图 19 角向分区比例为 1:3 的叶片照片

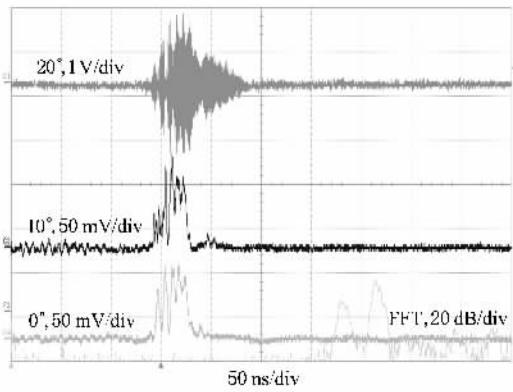


图 20 辐射场测量的双频率微波信号(检波)

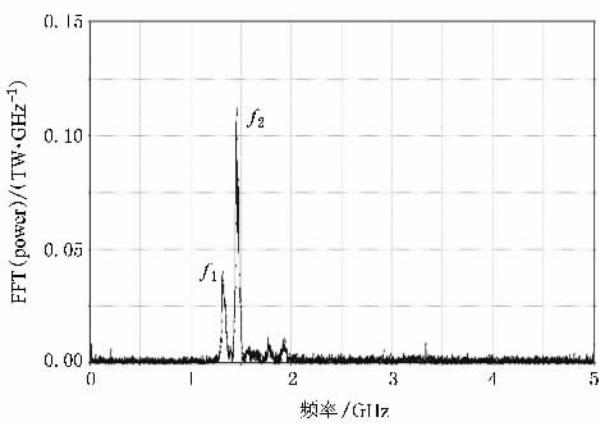


图 21 20°位置的微波信号的频谱

通过上述的实验研究表明: 对应于 BFMILo 的谐振腔深度的角向无分区的单频率 MILO 以及分区比例不同 BFMILo 都可以产生高功率微波. 表 1 列举了角向分区比例不同 BFMILo 的实验研究结果.

表 1 角向分区比例不同的 BFMILo 的实验结果

分区情况	频率数	频率/GHz
无分区, $r_0 = 140$ mm	单频	1.21
无分区, $r_0 = 129$ mm	单频	1.40
分区比例 1:1, $r_{01} = 140$ mm, $r_{02} = 129$ mm	双频	1.26/1.45
分区比例 1:2, $r_{01} = 140$ mm, $r_{02} = 129$ mm	双频	1.29/1.45
分区比例 1:3, $r_{01} = 140$ mm, $r_{02} = 129$ mm	双频	1.32/1.45

## 5. 结 论

本文建立了 L 波段 BFMILo 的实验系统和测量系统, 介绍了测量方法, 开展了 L 波段 BFMILo 的实验研究. 首先, 详细地热测试了分区比例为 1:1 的 BFMILo 的辐射方向图, 得到了稳定的双频率的 HPM 输出, 分析了微波波形, 通过辐射场功率密度的积分得到了微波的总功率. 在电子束电压约为 420 kV、管电流约为 34 kA 的条件下, BFMILo 输出的微波频率分别为 1.26 GHz 和 1.45 GHz, 对应的微波功率分别为 398 MW 和 222 MW.

通过对谐振腔深度的分区比例不同的 BFMILo 的实验研究表明: 对应于 BFMILo 的谐振腔深度的角向无分区的单频率 MILO 可以产生 HPM, 其微波的频率低于 BFMILo 对应的频率; 谐振腔深度的分区比例不同的 BFMILo 仍然可以产生双频率的 HPM, 分区的比例可以影响输出微波信号幅度的比例, 并且分区比例越小, 即扇形角度越小, 其对应的微波频率越高.

通过本文的实验研究, 得到了稳定的双频率 HPM, 成功地研制出了 L 波段 BFMILo, 实验与理论研究的结果比较一致, 验证了 BFMILo 产生稳定的 HPM 的可行性, 为双频 HPM 器件研究探索出一个新方向.

- [ 1 ] Chen D B , Meng F B , Wang D 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 429 ( in Chinese )[ 陈代兵、孟凡宝、王 冬 2009 强激光与粒子束 **21** 429 ]
- [ 2 ] Chen D B , Wang D , Fan Z K et al 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1702 ( in Chinese )[ 陈代兵、王 冬、范植开 2007 强激光与粒子束 **19** 1702 ]
- [ 3 ] Chen D B , Wang D , Meng F B et al 2008 *Proc of BEAMS* 11-O-01 231
- [ 4 ] Zhu C P , Feng R , Zhao Y Y 2000 *Chinese Science Bulletin* **45** 142
- [ 5 ] Chen D B , Fan Z K , Zhou H J et al 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1352 ( in Chinese )[ 陈代兵、范植开、周海京 2007 强激光与粒子束 **19** 1352 ]
- [ 6 ] Chen D B , Fan Z K , Dong Z W et al 2006 *Proc of EAPPC* Thu-013 549
- [ 7 ] Chen D B , Fan Z K , Dong Z W et al 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 820 ( in Chinese )[ 陈代兵、范植开、董志伟 2007 强激光与粒子束 **19** 820 ]
- [ 8 ] Wang D , Chen D B , Fan Z K et al 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 4875 ( in Chinese )[ 王 冬、陈代兵、范植开等 2008 物理学报 **57** 4875 ]
- [ 9 ] Lemke R W , Clark M C 1987 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **62** 3436
- [ 10 ] Barker R J , Schamiloglu E 2001 *High power microwave sources and technologies* ( Wiley :IEEE Press )
- [ 11 ] Lemke R W , Calico S E , Clark M C 1997 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **25** 364
- [ 12 ] Ding W , Dong Z W , Hao J H 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 4789 ( in Chinese )[ 丁 武、董志伟、郝建红 2006 物理学报 **55** 4789 ]
- [ 13 ] Fan Y W , Zhong H H , Li Z Q et al 2008 *Chin . Phys . B* **17** 1804
- [ 14 ] Chen D B , Wang D , Meng F B et al 2009 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **37** 23

## Experimental investigation of L-band bifrequency magnetically insulated transmission line oscillator<sup>\*</sup>

Chen Dai-Bing<sup>†</sup> Wang Dong Fan Zhi-Kai Meng Fan-Bao An Hai-Shi Gong Hai-Tao Qin Fen

( Institute of Applied Electronics , CAEP , Mianyang 621900 , China )

( Received 19 September 2008 ; revised manuscript received 16 November 2008 )

### Abstract

Experimental investigation of an L-band bifrequency( BF ) magnetically insulated transmission line oscillator( MILO ) based on azimuthal partition of cavity-depth , is carried out for the first time. Experimental system and measurement system of the BFMILo are set up. Far-field patterns of the antenna of the L-band BFMILo are obtained , and the total microwave power is obtained by integral of the power density of radiation field. Employing an electron beam of 420 kV , 34 kA , an L-band BFMILo can generate high power microwave ( HPM ) with two stable and separate frequencies. They are 1.26 GHz and 1.45 GHz respectively with power of 398 MW and 222 MW. Preliminary experimental results of BFMILOs with different azimuthal partition proportion are presented. The investigation proves the feasibility that BFMILo can generate HPM with two stable frequencies , which indicates an L-band BFMILo is developed successfully for the first time. A new direction of HPM investigations is pointed out.

**Keywords** : azimuthal partition , magnetically insulated transmission line oscillator( MILO ) , bifrequency MILO( BFMILo ) , high power microwave( HPM )

**PACC** : 2900 , 4100 , 4252

<sup>\*</sup> Project supported by the National Program of China .

<sup>†</sup> E-mail : turenture@sina.com.cn