

基于离轴高增益速调管的 X 波段高功率合成技术研究

占昌和 李天明 蒙林 李正红 吴洋 邵剑波

**X-band high power microwave combination technology based on the off-axis relativistic klystron amplifiers**

Zhan Chang-He Li Tian-Ming Meng Lin Li Zheng-Hong Wu Yang Shao Jian-Bo

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 238405 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.238405

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238405>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[0.14THz 基模多注折叠波导行波管的理论与模拟研究](#)

颜胜美, 苏伟, 王亚军, 徐翱, 陈樟, 金大志, 向伟

2014, 63(23): 238404. 全文: [PDF](#) (1139KB)

[基于三端口网络模型的折叠波导行波管注波相互作用理论研究](#)

颜卫忠, 胡玉禄, 李建清, 杨中海, 田云先, 李斌

2014, 63(23): 238403. 全文: [PDF](#) (713KB)

[S 波段长脉冲相对论速调管放大器中杂模振荡导致的脉冲缩短抑制研究](#)

陈昭福, 黄华, 常安碧, 许州, 何琥, 雷禄容, 胡进光, 袁欢, 刘振帮

2014, 63(23): 238402. 全文: [PDF](#) (920KB)

[相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究](#)

陈再高, 王建国, 王玥, 朱湘琴, 张殿辉, 乔海亮

2014, 63(3): 038402. 全文: [PDF](#) (908KB)

[带状注速调管多间隙扩展相互作用输出腔等效电路的研究](#)

陈姝媛, 阮存军, 王勇

2014, 63(2): 028402. 全文: [PDF](#) (2076KB)

# 基于离轴高增益速调管的X波段高功率合成技术研究\*

占昌和<sup>1)2)†</sup> 李天明<sup>1)</sup> 蒙林<sup>1)</sup> 李正红<sup>2)</sup> 吴洋<sup>2)</sup> 邵剑波<sup>3)</sup>

1)(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2)(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

3)(西南科技大学理学院, 绵阳 621010)

(2014年7月9日收到; 2014年7月30日收到修改稿)

为了克服强流高增益速调管放大器中的自激振荡和适应低阻抗脉冲功率源发展的需要, 利用高阻抗X波段五腔高增益速调管放大器进行了离轴八注八管高增益速调管功率合成技术研究, 在频率为9.47 GHz、模拟输出功率为284 MW、增益为51.6 dB和效率为35.5%条件下, 该器件整管微波输出稳定. 在三维模型中, 在离轴54 mm条件下该器件的微波输出特性稳定. 基于实验室现有4.5 T (长1.1 m, 室温孔径为150 mm) 超导磁体, 进行了八注八管高增益速调管的整管模拟, 每个器件实现284 MW的微波输出. 最后, 为实现GW级功率输出, 利用HFSS软件设计了用于离轴八注八管高增益速调管功率合成的八合一功率合成器, 将该合成器同八注八管高增益速调管结合, 模拟得到功率为1.84 GW、增益为50.7 dB、效率为28.8%的微波输出.

**关键词:** 高增益相对论速调管, 多注速调管, 功率合成

**PACS:** 84.40.Fe, 85.40.-e, 41.20.-q, 41.20.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.63.238405

## 1 引言

在过去的几十年, 由于相对速调管放大器件 (relativistic klystron amplifier, RKA) 具有高功率、高频率、高稳定性等优点<sup>[1]</sup>, 所以被广泛应用在加速器、高功率雷达、新型通信系统等领域<sup>[2]</sup>. 但是随着应用需求的发展, 常规结构RKA在向更高峰值功率与工作频率的方向发展时出现了一些无法克服的困难<sup>[3, 4]</sup>. 针对高功率与工作频率的需求, 本文开展了类似多注RKA<sup>[5]</sup>的多注多管高增益RKA的高功率合成技术研究. 针对强流高增益速调管放大器中的自激振荡问题, 通过改变器件二极管阻抗, 使得器件内电子束流强低于速调管放大器自激振荡的起振电流, 本文设计了一个高阻抗(800  $\Omega$ )的X波段五腔高增益RKA器件. 同时为了适应低阻抗脉冲功率源发展的需要, 对离轴电

子束的运动进行了相应研究, 研究结果表明离轴的器件同样可以正常工作<sup>[6]</sup>. 最后为了实现GW级功率输出, 利用HFSS软件设计了八合一功率合成器, 结合八合一功率合成器进行八注八管高增益RKA整体模拟, 得到了功率为1.84 GW、频率为9.47 GHz的微波输出功率、整管增益为50.7 dB、效率为28.8%.

## 2 高阻抗X波段高增益速调管放大器

### 2.1 二维(2D)模型

如图1所示, 通过提高器件二极管阻抗, 使得器件内电子束流强低于速调管放大器自激振荡的起振电流, 设计了一个高阻抗(800  $\Omega$ )的X波段五腔高增益RKA器件以克服强流高增益RKA中的自激振荡, 器件包括一个输入腔、三个中间腔和一个四腔圆盘加载波导输出腔.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60501013)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhanchanghe1989@163.com

表 1 各腔的高频特性

	输入腔	第一个中间腔	第二个中间腔	第三个中间腔	输出腔
谐振频率/GHz	9.58	9.50	9.63	9.63	9.48
$Q_0$	8.46	$\infty$	$\infty$	$\infty$	177.64
半径/mm	14	14	14	14	16
间隙距离/mm	7.0	6.5	7.0	7.0	5.0

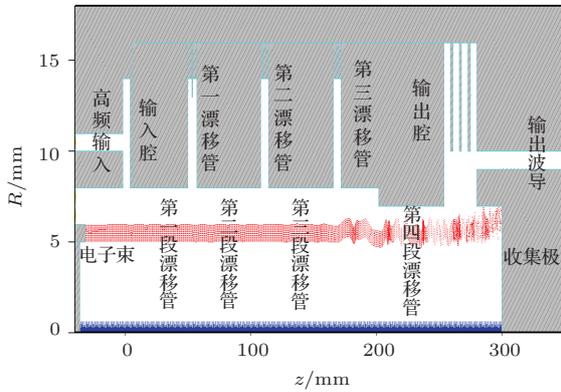


图 1 五腔高增益RKA的2D结构示意图

输入腔和中间腔都是采用 $TM_{010}$ 模作为谐振模式的圆波导谐振腔 [7], 其冷腔的高频特性参数如表 1 所列. 为降低调制电子束能散, 增大器件工作带宽, 中间腔的频率采用参差调谐的方式 [8].

输出腔是由四腔组成的 $\pi/4$ 圆盘加载波导的慢波结构 [9,10], 由多个圆波导谐振腔组成的慢波结构作为输出腔可以降低输出间隙处的间隙场强, 提高输出微波功率.

各漂移管的几何参数见表 2. 第四段漂移管由两段半径不同的管子组成, 第四段漂移管长度的确定是根据电流的调制深度 [11], 要使其达到最大. 注入电子的速度为 1 kA, 在模拟中当第四段漂移管的长度为 80 mm 时, 电流的调制深度在输出腔位置达到最大 (约为 112%).

表 2 各漂移管的几何参数

	长度/mm	半径/mm
第一段漂移管	40	8
第二段漂移管	50	8
第三段漂移管	50	8
第四段漂移管	30	8
	50	7

RKA 的高频输入和高频输出均采用同轴线, 它们的内外半径分别为 10 mm 和 11 mm, 9 mm 和 10 mm. 采用粒子模拟软件对图 1 所示的五腔高增益 RKA 进行 2D 模拟. 模拟条件为: 馈入微波功率

为 2.77 kW, 频率为 9.45 GHz, 束压为 800 kV, 束流为 1.0 kA, 电子束的内外半径分别为 5 mm 和 6 mm, 引导磁场 (均匀磁场) 为 2.0 T. 图 2 (a) 为器件内部纵向电场分布, 微波输出功率包络见图 2 (b), 相应的微波输出功率为 300 MW, 频率为 9.45 GHz, 增益为 50.3 dB, 效率为 37.5%, 同时在模拟过程没有出现自激振荡.

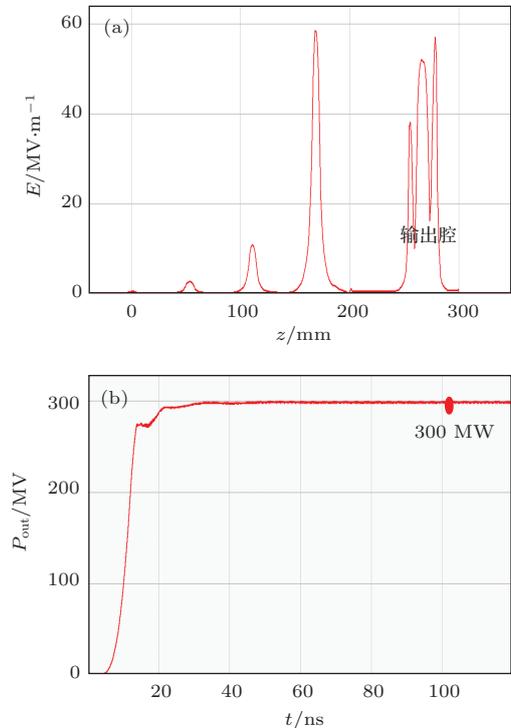


图 2 五腔高增益 RKA 的 2D 模拟结果 (a) 纵向电场强度; (b) 输出微波功率包络

### 2.2 三维 (3D) 模型

结合 2D 模拟结构, 设计出了 X 波段五腔高增益 RKA 的 3D 模型 (图 3). 3D 模型的谐振腔体、漂移管尺寸和 2D 模型相同 (表 1 和表 2), 高频输入是矩形波导 (18 mm × 4 mm) 馈入微波, 微波输出是同轴线输出, 内导体与外导体之间加了两个支撑杆 (8 mm × 2 mm × 2 mm), 起到固定内导体的作用. 模拟条件为: 馈入微波功率为 1.96 kW, 频率为 9.47 GHz, 束压为 800 kV, 束流为 1.0 kA, 电子束

的内外半径分别为5 mm和6 mm, 引导磁场(螺线管线圈磁场)为1.96 T. 模拟得到的输出微波频谱和功率包络图如图4所示. 由图4(b)可知, 输出功率为284 MW, 同图2(b)的输出功率比较发现, 两者相差不大, 说明3D模拟结果同前面2D模拟结果是一致的.

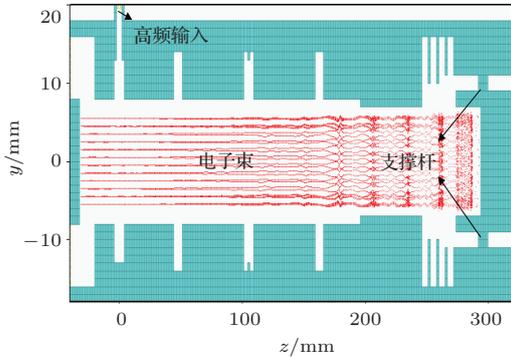


图3 五腔高增益RKA的3D结构示意图

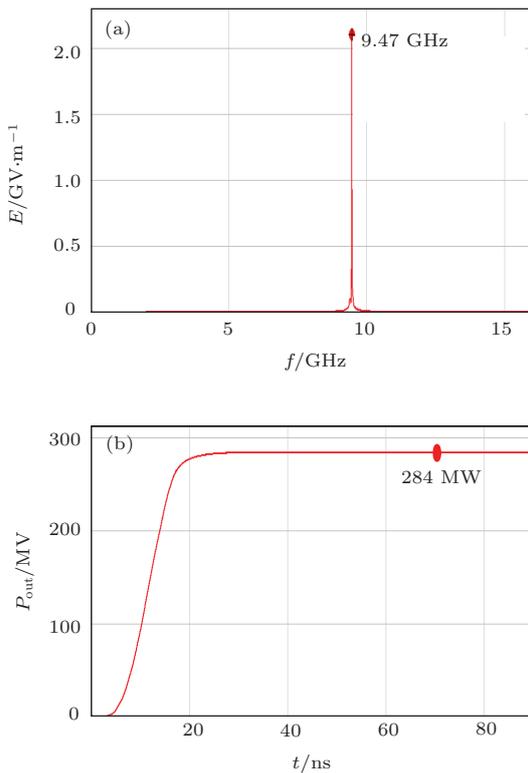


图4 五腔高增益RKA的3D模拟结果 (a) 输出微波频谱; (b) 输出微波功率包络

### 3 离轴高增益RKA

上述设计的X波段高增益RKA二极管的阻抗为800 Ω, 这样的阻抗很难同现有的脉冲功率源匹

配. 为了同脉冲功率匹配, 以及适应低阻抗脉冲功率源发展的需要, 本文通过并联多个同时工作的高增益RKA器件来降低器件的二极管阻抗, 进而实现同脉冲功率源的匹配. 但如果并联多个器件需用多个单独的磁体去聚束电子束, 不利于发展小型化的高功率合成技术. 为了可以在实验室现有超导磁体半径(75 mm)内并联多个器件同时工作, 本文设计的高增益RKA是工作在非过模条件下的, 而且结构尺寸较小, 可以在同一磁体内多个器件同时工作, 因此需要考虑离轴对器件工作的影响.

#### 3.1 离轴电子束运动分析

引导磁场为螺线管线圈, 电子沿磁力线运动时, 在垂直于磁力线方向上做回旋运动, 即电子回旋中心随磁力线的偏转而偏转. 对离轴的电子束运动进行模拟, 得到图5(a)所示的电子束轮廓图, 与图5(b)所示的磁力线的分布曲线比较可知, 上述分析是正确的, 即离轴的电子束在端尾整体随磁力线的偏转而偏转. 但是中间段的电子束运动是被约束在轴向方向上的, 不影响电子束同离轴的器件腔体之间的相互作用, 因此高增益RKA可在离轴条件下工作.

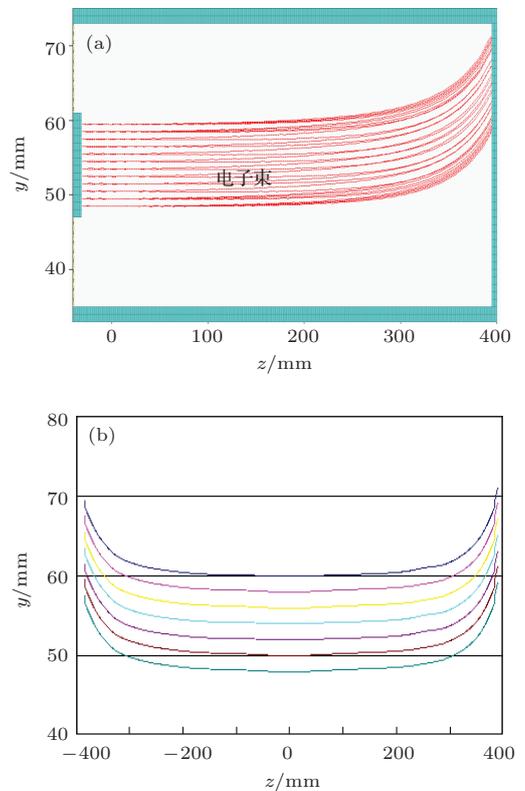


图5 (a) 离轴条件下, 强流环形电子束的包络; (b) 磁力线的分布

### 3.2 单管离轴高增益RKA模拟

将上述设计的3D结构器件放在螺线管线圈中间段离轴54 mm处(图6),并在相同的模拟条件下进行模拟研究,模拟得到了离轴互相作用的电子束包络(图7)和输出功率包络(图8).模拟得到频率为9.47 GHz,输出功率为282 MW,增益为51.6 dB和效率为35.2%的微波输出,结果表明器件的输出功率的变化很小(小于2 MW,图8和图4(b)).

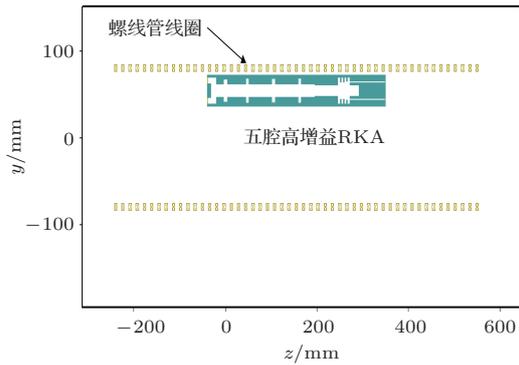


图6 离轴54 mm的五腔高增益RKA示意图

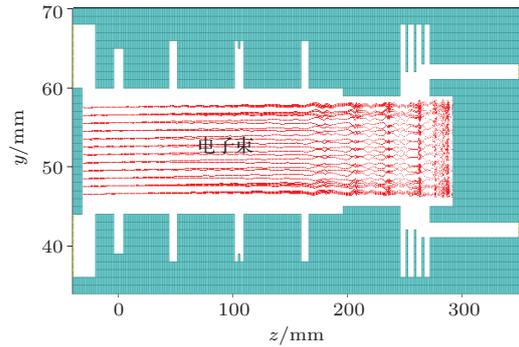


图7 离轴互相作用的电子束包络

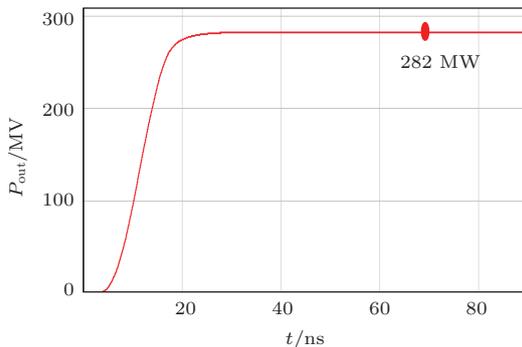


图8 离轴54 mm器件的输出功率包络

为研究器件离轴远近对输出功率的影响,将3D五腔高增益速调管放置在离轴不同的距离上,得到了图9所示的输出功率随离轴距离的变化曲

线.由图9可知,输出功率随离轴距离的增加而减小,但减少量并不大(小于3 MW),这是因为纵磁场强度随离轴距离的增加略有减少.

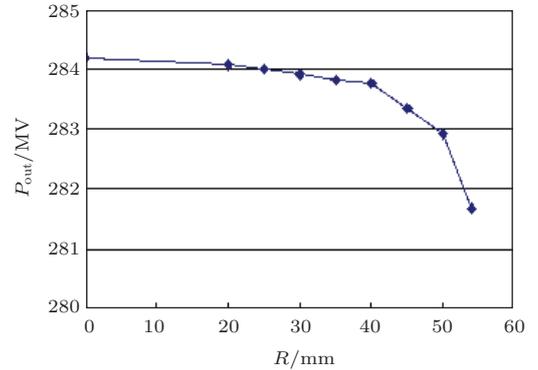


图9 输出功率随离轴距离的变化

### 3.3 多注多管离轴高增益RKA模拟

从上述模拟结果可知,单个X波段五腔高增益RKA的输出功率可以达到282 MW,要达到GW级输出功率必须考虑多注或多管高增益RKA功率合成路线.基于线路功率合成技术,设计了在离线圈两端的距离分别为320, 180 mm的磁场区域内和离轴距离为54 mm的圆上放置八注八管X波段五腔高增益RKA放大器件,如图10所示.

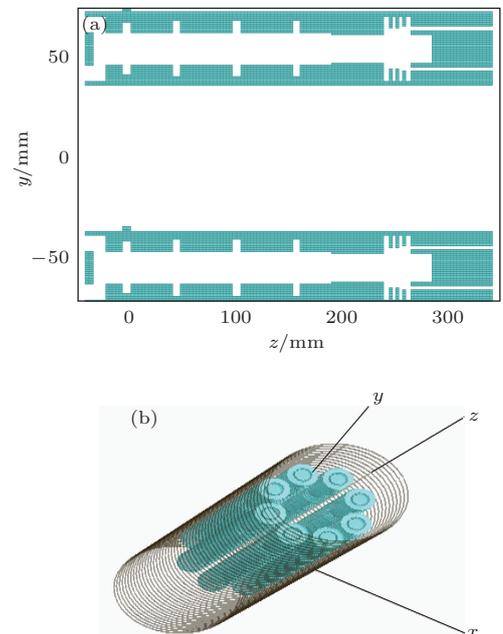


图10 离轴八注八管高增益速RKA示意图 (a) yz截面图; (b) 立体图

当八管五腔高增益RKA同时馈入频率为9.47 GHz、功率为1.96 kW、束压为800 kV、束流为

1.0 kA 的微波(引导磁场为 2.00 T)时, 模拟可得每个器件输出功率为 284 MW (图 11).

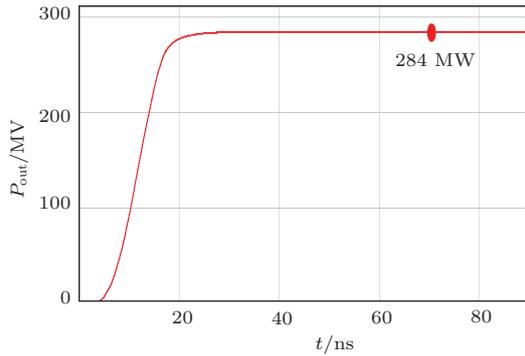


图 11 离轴 54 mm 的每个器件输出功率包络

#### 4 离轴八注八管高增益 RKA 的功率合成

为了将离轴八注八管高增益 RKA 的功率进行合成, 设计如图 12 所示的八合一功率合成器 [12], 具体输出过程是同轴 TEM 转圆波导  $TM_{01}$  再通过磁耦合转矩形波导  $TE_{10}$  输出, 之后利用中间谐振腔的转向波导和八路矩形波导  $TE_{10}$  合成圆波导  $TE_{01}$  输出(图 13).

利用 HFSS 软件对八合一功率合成器进行计

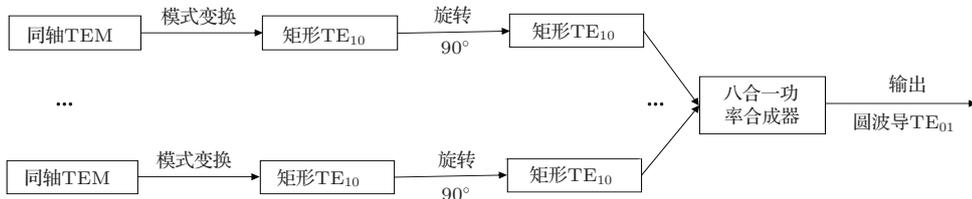


图 13 八合一功率合成器的结构示意图

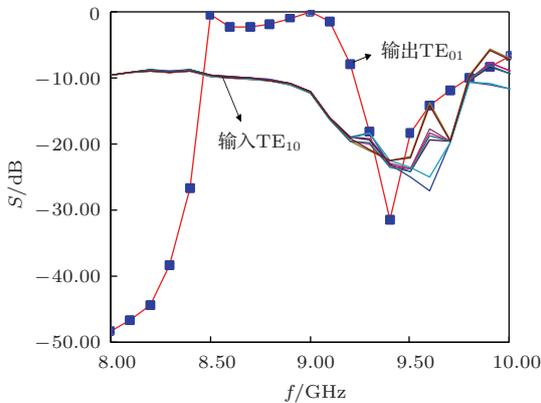


图 14 八合一功率合成器的回波损耗

算, 得到各端口回波损耗随频率的变化曲线(图 14)和输出圆波导的电场强度分布(图 15). 由图 14 可知, 当频率为 9.47 GHz 时输出圆波导的回波损耗为  $-18.22$  dB, 八个输入矩形波导  $TE_{10}$  模的回波损耗都小于  $-23.83$  dB. 从图 15 可以看出, 圆波导输出模式为  $TE_{10}$ , 保证了合成微波为  $TE_{10}$  的单模输出.

利用上述功率合成器将离轴八注八管高增益 RKA 进行合成, 在 MAGIC 粒子软件中建立模型(其  $yz$  截面如图 16 所示), 并进行整管模拟. 图 17 给出了模拟得到的合成输出微波的包络, 此器件的合成输出功率为 1.84 GW, 增益为 50.7 dB, 效率为 28.8%.

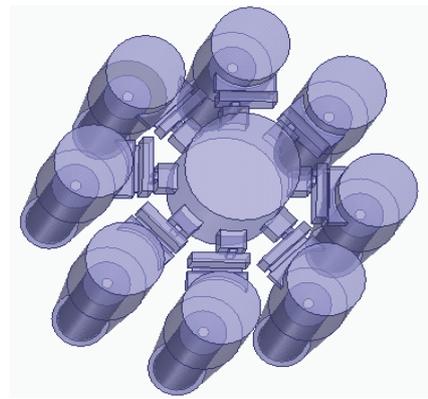


图 12 八合一功率合成器

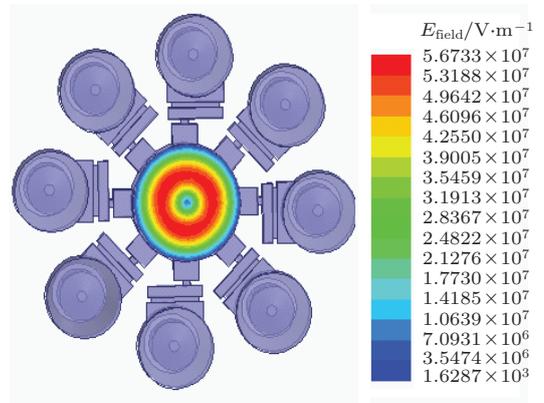


图 15 八合一功率合成器的电场强度

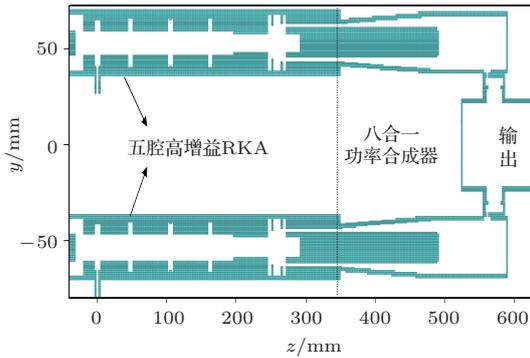


图 16 离轴八注八管高增益 RKA 加功率合成器的  $yz$  截面图

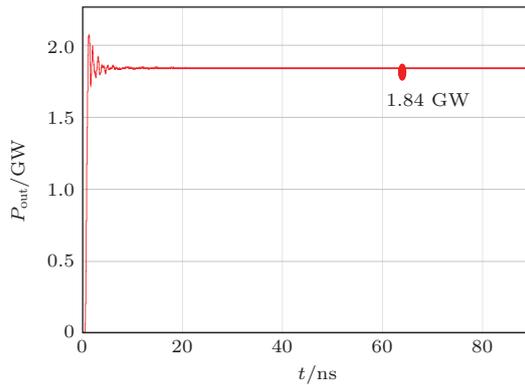


图 17 离轴八注八管高增益 RKA 合成功率包络

## 5 结 论

本文成功地设计出频率为 9.47 GHz、输出功率为 284 MW、增益为 51.6 dB、效率为 35.5% 的高阻抗五腔高增益速调管放大器, 并对器件的离轴和离轴八注八管状态进行了研究, 研究结果表明离轴的器件同样可以正常工作. 并将离轴八注八管高增益

速调管的输出微波利用八合一功率合成器进行功率合成, 获得了功率为 1.84 GW、增益为 50.7 dB、效率为 28.8% 的微波输出.

## 参考文献

- [1] Serlin V, Frideman M 1994 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** 692
- [2] Benford J, Swegle J 1992 *High Power Microwave* (2nd Ed.) (New York: Taylor and Francis Group) pp35–82
- [3] Barker R J, Schamiloglu E (translated by Liu G Z, Zhou Z M) 2005 *High Power Microwave Sources and Technologies* (Beijing: Tsinghua University Press) pp57–63 (in Chinese) [巴卡 R J, 谢米洛格鲁 E 著 (刘国治, 周传明译) 2005 高功率微波源与技术 (北京: 清华大学出版社) 第 57—63 页]
- [4] Friedman M, Krall J 1988 *J. Appl. Phys.* **55** 3353
- [5] Sun P, Ding Y G, Zhao D 2007 *High Power Laser Particle Beams* **19** 807 (in Chinese) [孙鹏, 丁耀根, 赵鼎 2007 强激光与粒子束 **19** 807]
- [6] Liu S G 1989 *Relativistic Electronics* (Beijing: Science Press) pp101–102 (in Chinese) [刘盛纲 1989 相对论电子学 (北京: 科学出版社) 第 101—102 页]
- [7] Wu Y, Xie H Q, Xu Z 2014 *Chin. Phys. C* **38** 017001
- [8] Chen Y D, Wu Y, Xie H Q, Li Z H, Zhou Z G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104104 (in Chinese) [陈永东, 吴洋, 谢鸿全, 李正红, 周自刚 2013 物理学报 **62** 104104]
- [9] Luo J G, Cui J, Zhu M, Guo W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067803
- [10] Xu X, Wei Y Y, Shen F, Huang M Z, Tang T, Duan Z Y, Gong Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 068402
- [11] Cheng H, Xie H Q, Liu Y H, Li Z H, Wu Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 018402 (in Chinese) [成会, 谢鸿全, 刘迎辉, 李正红, 吴洋 2014 物理学报 **63** 018402]
- [12] Sun P, Ding Y G, Zhao D 2007 *High Power Laser Particle Beams* **19** 1865 (in Chinese) [孙鹏, 丁耀根, 赵鼎 2007 强激光与粒子束 **19** 1865]

# X-band high power microwave combination technology based on the off-axis relativistic klystron amplifiers\*

Zhan Chang-He<sup>1)2)†</sup> Li Tian-Ming<sup>1)</sup> Meng Lin<sup>1)</sup> Li Zheng-Hong<sup>2)</sup> Wu Yang<sup>2)</sup>  
Shao Jian-Bo<sup>3)</sup>

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

3) (School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

( Received 9 July 2014; revised manuscript received 30 July 2014 )

## Abstract

In this paper, in order to overcome the self-excited oscillation in the high-gain relativistic klystron amplifier, an X-band high-gain relativistic klystron amplifier (RKA) is designed driven by the relativistic beam with its current at a kA-level. The corresponding diode impedance is  $800 \Omega$ . Its output power reaches 284 MW at the frequency of 9.47 GHz, and the gain and efficiency are 50.6 dB and of 37.4% respectively when the beam voltage is of 800 kV. And for the obtained GW-level RF power in low-impedance pulsed power sources, the power microwave combination technology of off-axis eight-tube high-gain RKA is used. In the three-dimensional model, the microwave output of this kind of RKA is almost constant when the device is at off-axis 54 mm. Simulation is based on the 4.5 T superconducting magnet which is 4.5 m long in the laboratory, and the eight-tube high-gain RKA is simulated using a magnet with the microwave output of 284 MW. Then an eight to one power combiner is designed using HFSS software, and the combiner with eight-tube high-gain RKAs is simulated by a three-dimensional model. Its output power is 1.84 GW, with a gain of 50.7 dB and efficiency of 28.8% respectively.

**Keywords:** high-gain relativistic klystron, multiple-beam klystron, power synthesis

**PACS:** 84.40.Fe, 85.40.-e, 41.20.-q, 41.20.Jb

**DOI:** [10.7498/aps.63.238405](https://doi.org/10.7498/aps.63.238405)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60501013).

† Corresponding author. E-mail: [zhanchanghe1989@163.com](mailto:zhanchanghe1989@163.com)