

250 MHz 固态功率放大器的设计

丁洪利^{1,2} 赵明华¹ 肖诚成¹ 钟少鹏¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 固态功率源代替真空管功率源设备是目前射频功率源系统的发展趋势。本文介绍了一台工作在 250 MHz 的固态功率放大器模块的设计过程。放大器模块使用荷兰恩智浦半导体公司生产的 BLF578XR 型号晶体管,并且采用传输线匹配和集总元件匹配相结合的方式进行设计。通过理论计算得到匹配网络的初始值,并利用 ADS (Advanced Design System)软件对匹配电路进行仿真和优化。测试结果表明,该功率放大器模块输出功率达到了 850 W,功率增益达到了 26 dB,功率附加效率达到 60%。结果表明,该设计完全达到了系统设计要求的性能指标,并具有较强的实用性。

关键词 功率放大器, 固态功率源, 匹配网络

中图分类号 TL503.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060401

Design of a 250-MHz solid-state power amplifier

DING Hongli^{1,2} ZHAO Minghua¹ XIAO Chengcheng¹ ZHONG Shaopeng¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: The development trend of radio frequency power source systems is to replace vacuum power source devices with solid-state power amplifiers. **Purpose:** This paper introduces the design process of a solid-state power amplifier operating at a frequency of 250 MHz. **Methods:** A BLF578XR transistor manufactured by NXP semiconductor has been used in the amplifier model. The design of matching network adopts the method of combining transmission lines and lumped elements. The initial value in matching network was achieved through theoretical calculation, then simulated and optimized by the software ADS (Advanced Design System). **Results:** The results of measurement showed that the output power of power amplifier module was over 850 W, power gain was over 26 dB, and power added efficiency was over 60%. **Conclusion:** The designed parameters were all achieved in the power amplifier module, which can be further applied in scientific use.

Key words Power amplifier, Solid-state power source, Matching network

250 MHz 是一个典型的频率,在能量回收型直线加速器(Energy Recovery Linac, ERL)、质子医疗加速器等很多方面都有着广泛的应用前景。几年前,由于固态功率晶体管输出功率的限制,微波功率源

设备一直是以速调管等真空管器件为主。固态功率放大器只能为真空管器件提供前端的功率驱动^[1]。随着横向扩散金属氧化物半导体(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor, LDMOS)等晶体管技术

中国科学院知识创新工程重大项目(No.455011061)资助

第一作者:丁洪利,男,1987年出生,2010年毕业于合肥工业大学,现为博士研究生,研究领域为核技术及应用

通信作者:赵明华, E-mail: zhaomh@sinap.ac.cn

Supported by the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No.455011061)

First author: DING Hongli, male, born in 1987, graduated from Hefei University of Technology in 2010, doctor student, major in nuclear technology and application

Corresponding author: ZHAO Minghua, E-mail: zhaomh@sinap.ac.cn

收稿日期:2016-01-27,修回日期:2016-04-12

的不断发展,许多功率晶体管在 10–500 MHz 频率上单管输出功率已经达到百瓦甚至千瓦量级^[2]。因此固态功率放大器在甚高频(Very High Frequency, VHF)和特高频(Ultra-high Frequency, UHF)的频段上替代真空管放大器在加速器上的应用逐渐成为可能。

比起真空管器件,固态功率放大器有很多优点,例如便于生产和安装、使用寿命长、工作电压低、较低的运行损耗和易于维护等^[3]。基于这些优点,国内外很多加速器实验室都已经将固态功率放大器技术应用到他们的实验当中。例如法国的 SOLEIL 光源使用一台工作在 352 MHz、输出功率为 35 kW 的固态功率放大器为增强器腔体提供功率,4 台工作在 352 MHz、输出功率为 180 kW 的固态功率放大器为储能环的超导腔提供功率^[4]。印度的巴巴原子研究中心(Bhabha Atomic Research Center),研制了一台输出功率为 3 kW、工作频率在 325 MHz 的固态射频功率放大器为一个 200 MeV 加速器的单辐射谐振器提供功率^[5]。瑞士保罗谢尔研究所(Paul Scherrer Institute)为瑞士光源设计并研发了一台工作在 500 MHz、输出功率为 4 kW 的固态射频功率放大器为瑞士光源的增强器提供功率^[6]。

本文介绍一台工作于 250 MHz 的固态射频大功率放大器模块的设计过程和实验结果。该模块将用于组成一个 100 kW 固态功率源为 ERL 电子枪提供功率。在放大器模块的设计过程中,通过分析阻抗匹配网络结构的方法,设计了放大器的输入输出阻抗匹配网络。并利用公式初步确定匹配网络的元件参数,使用 ADS 软件的仿真模拟功能对其进行仿真分析,最终将实验测试结果与仿真结果进行了比较。

1 功率放大器的设计指标

单个固态功率放大器模块的性能影响整个固态功率源的性能。其输出功率的大小决定固态功率源的模块数量和体积^[7]。为满足 ERL 电子枪的要求,我们目的是设计并制造一个工作频率在 250 MHz、输出功率为 850 W、功率附加效益大于 60%、功率

增益至少为 24 dB 的固态功率放大器模块。

2 功率放大器模块的设计

选择恩智浦半导体公司生产的 BLF578XR 型号 LDMOS 晶体管作为设计芯片。该晶体管由两个处于推挽结构的子晶体管封装而成。在恩智浦半导体公司的官网上可以找到 BLF578XR 晶体管的仿真模型。将其导入 ADS 软件中,对其进行仿真模拟^[8]。通过直流仿真将漏极电压设置在 50 V 处,栅极电压设置在 2.1 V 处,此时晶体管的静态电流为 0.88 A,晶体管处于 AB 类工作模式。

为了让固态功率放大器的输出功率最大化,信号源和负载与晶体管之间需要增加匹配网络实现共轭匹配,以使源传输到负载实现最大功率。共轭匹配时,输出功率的最大值为^[9]:

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{1}{4R_g} \quad (1)$$

式中: V_g 为源电压; R_g 为源阻抗的实部。

使用 ADS 软件的阻抗牵引模块进行仿真计算,可以得到晶体管的输入阻抗和输出阻抗的值。选择输入阻抗为 $(0.13 - j0.8) \Omega$ 和输出阻抗为 $(3.0 - j1.3) \Omega$ 的值来设计晶体管输入和输出端的阻抗匹配网络。

由于 BLF578XR 晶体管的两个子晶体管处于推挽结构,所以在匹配网络中必须包含平衡不平衡转换器,俗称巴伦。1:1 同轴波导巴伦可以将输入功率等分,输出信号相位相差 180° ,匹配阻抗从 50Ω 降低到 25Ω 。

匹配网络结构的设计使用了微带线与集总元件混合的方式。放大器阻抗匹配的结构图如图 1 所示,它可以看作是一个四端口网络。由于巴伦的存在,从两个输入端口进入网络的信号相位相差 180° ,属于奇模方式输入。在匹配网络的对称线上,电压为零,电流虚短。该四端口网络结构可以分解成两个二端口网络。每个二端口网络是由几个 L 型网络串联而成。

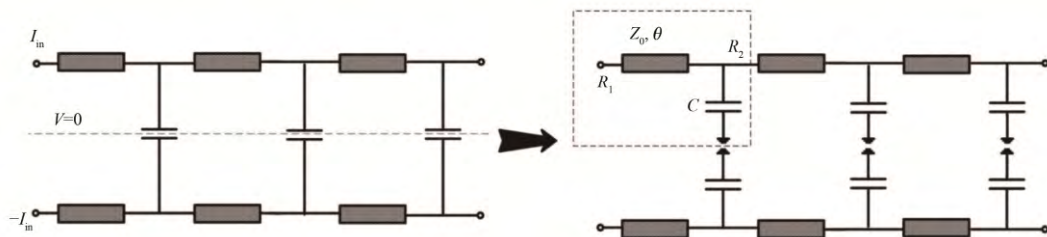


图 1 匹配网络示意图
Fig.1 Schematic diagram of the matching network.

一个由串联微带线和并联电容组成的 L 型网络可使用公式：

$$C = \frac{Q}{\omega R_1} \quad (2)$$

$$\sin 2\theta = \frac{2Q}{\left(\frac{Z_0 - R_2}{R_2} - \frac{R_2}{Z_0}\right)} \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_1}{R_2} \left[\cos^2 \theta + \left(\frac{R_2}{Z_0}\right)^2 \sin^2 \theta \right]} - 1 \quad (4)$$

式中： θ 为微带线的电长度； Z_0 为微带线的特征阻抗； C 为并联电容。将任意电阻 R_1 共轭匹配到任意电阻 R_2 上^[10]。通过式(2)–(4)，可以算出每个 L 型网络中元件的初始参数。输入和输出阻抗匹配网络初步设计完成之后，使用 ADS 软件对其进行仿真和优化。谐波平衡仿真法可以仿真得到功率放大器的输出功率、功率增益和功率附加效率。放大器模块的仿真结果如图 2 所示。

从图 2 中看到，固态功率放大器模块一分贝压缩点处，功率增益(G_p)可以达到 28 dB，输出功率大于 60 dB，功率附加效率(Power Added Efficiency, PAE)为 60%。

固态功率放大器的设计如图 3 所示。在图 3 中电容 C_2 – C_6 和微带线 T_3 、 T_4 组成了输入阻抗匹配网络。同时 C_{15} – C_{23} 和微带线 T_5 、 T_6 组成了输出匹配网络。电路图中由输入端的同轴线 B_1 和微带线 T_1 、 T_2 与输出端的同轴线 B_2 微带线 T_7 、 T_8 分别组成了

1:1 的同轴线巴伦。在漏极直流偏置电路中，一对 470 μ F 的电容对高频信号起到短路的作用，可以防止射频信号通过直流偏置电路泄漏到直流电源中。在栅极直流偏置网络中，增加了旁路电容 C_7 – C_{10} ，用来抑制射频噪声。在输入匹配网络中，添加了一个大阻值的电阻用来降低输入匹配网络的 Q 值，从而增加放大器的稳定性。在电路的输出端，增加了一个环形器，用来保护功率晶体管，防止其被因意外失配产生的反射功率所烧毁。在环形器的第三个端口，接有一个 50 Ω 的负载用来消耗这些不需要的反射功率。

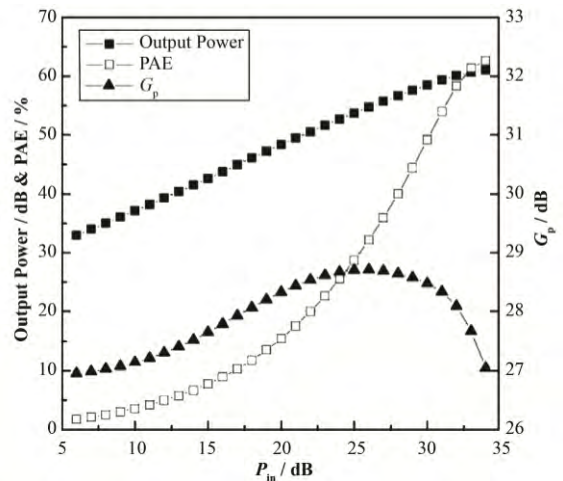


图 2 功率放大器模块性能的仿真结果
Fig.2 Simulated performance parameters of the power amplifier.

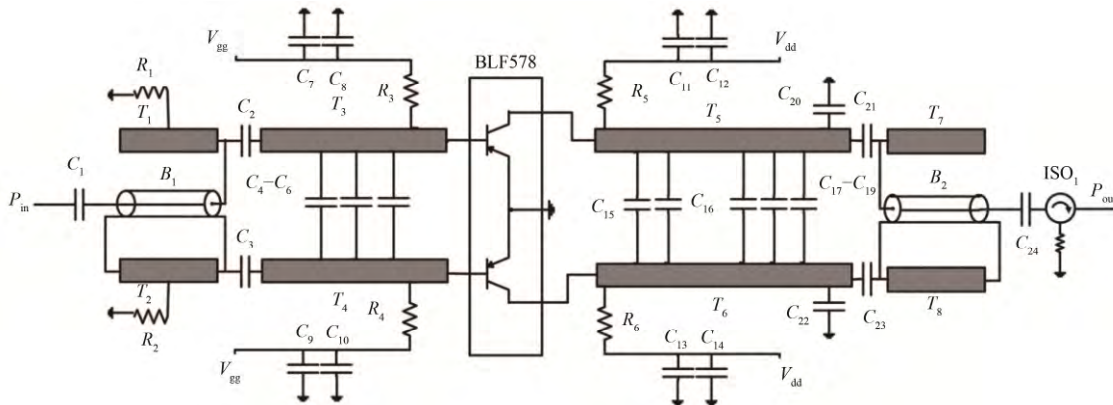


图 3 放大器模块示意图
Fig.3 Schematic of the amplifier module.

3 功率放大器模块的性能测试实验

本设计使用的基板是 Rogers 公司的 RT5880 型号的低耗微波基板。该基板的厚度为 0.254 mm，介电常数为 2.2。功率放大器模块的电路版图照片如图

4 所示。

由于功率放大器是工作在连续波状态下，并且放大器模块拥有 850 W 的输出功率和大于 60% 的工作效率。意味着放大器模块在工作时，至少会产生 560 W 的热耗散。为了使放大器模块能够正常地工

作, 需要一个水冷系统对其进行冷却。水冷系统如图 5 所示, 由一个拥有水槽的金属散热器组成。固态功率放大器模块会附连在散热器上。当固态功率放大器模块工作时, 金属散热器的水槽将会通入循环的冷却水, 可以有效地降低功率放大器的温度, 保证其正常工作。

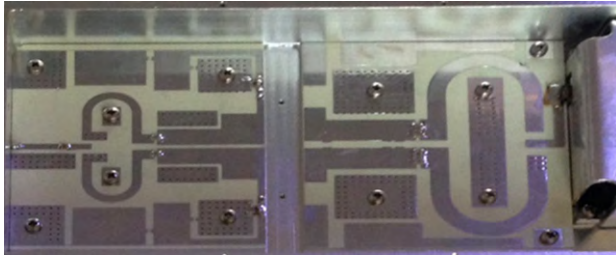


图 4 放大器模块的电路版图照片
Fig.4 Photograph of the power module' circuit layout.

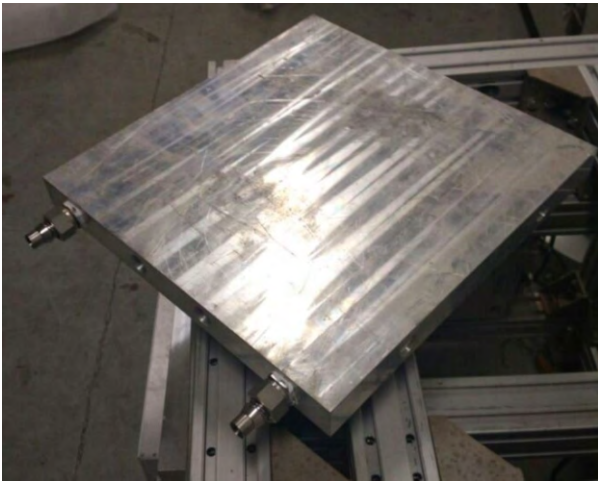


图 5 水冷模块的照片
Fig.5 Photograph of the water-cooling module.

功率放大器的参数测试平台如图 6 所示。测量平台是由一个信号发生器、一个直流供给、一个功率计、一个前级放大器和一个功率衰减器组成。信号发生器是美国安捷伦科技(Agilent Technologies)公司生产的 E8247C 型 PSG CW 信号发生器, 频率宽度从 250 kHz-20 GHz。功率计是安捷伦公司的 E4416A 型号 EPM-P 系列功率计。

固态功率放大器的参数测试结果如图 7 所示。从图 7 中可以看到, 在 1 dB 压缩点处, 功率放大器的增益为 25 dB, 输出功率为 870 W, 功率附加效率为 60%。放大器模块实际测试结果与仿真时的数据相比, 除了功率附加效益, 其他各项都略有降低。这是由于在放大器模块制造的过程中不可避免地引入的寄生参数导致匹配度降低的结果。放大器模块的性能测试实验结果表明, 该放大器模块满足设计要求。

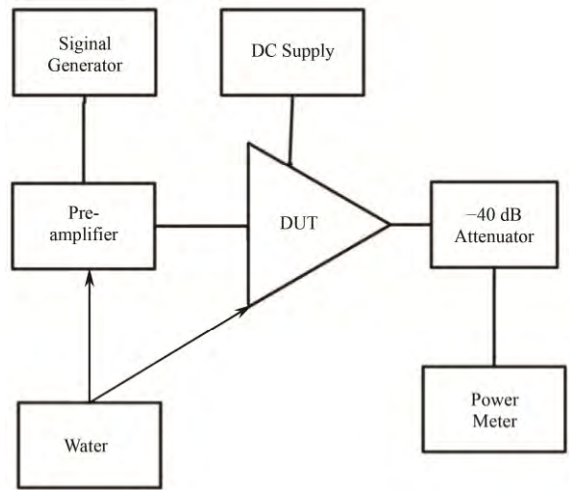


图 6 放大器测试平台
Fig.6 Measurement setup of the amplifier.

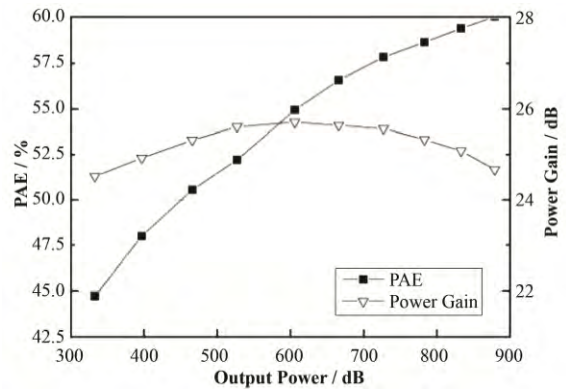


图 7 功率放大器性能测试
Fig.7 Measured performance parameters of power amplifier.

4 结语

设计并制造了一个工作在 250 MHz、输出功率达到 59.4 dBm、功率增益为 25 dB 的固态功率放大器模块, 为未来 100 kW 固态功率源的制造提供宝贵的经验, 并且有重要的参考价值。设计过程中, 通过分析阻抗匹配网络结构的方法, 利用公式计算确定了匹配阻抗网络的初始参数, 在 ADS 软件的辅助下完成了对放大器模块的设计。经过完整的参数性能测量, 功率放大器模块的各项指标均达到了设计要求。结果证明了本文使用的设计方法是正确且有效的, 为未来大规模设计并制造固态功率放大器模块奠定了基础, 是一次有意义的尝试。

参考文献

- 1 Godefroy J M, Ribeiro F, Ruan T, *et al.* MOSFET RF power amplifier for accelerator applications[C]. 6th European Particle Accelerator Conference, 1998: 22-26. <http://epaper.kek.jp/e98/PAPERS/TUP04A.PDF>

- 2 Kühn J, Musser M, Raay F, *et al.* Design and realization of GaN RF-devices and circuits from 1 to 30 GHz[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2010, **2**: 115–120. DOI: 10.1017/S175907871000019X
- 3 Marchand P, Ruan T, Ribeiro F, *et al.* High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the synchrotron SOLEIL[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2007, **10**: 112001. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.10.112001
- 4 Marchand P, Lopes R, Ribeiro F, *et al.* Development of high RF power solid state amplifiers at SOLEIL[C]. Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, 2011. http://www.ipac2011.org/pre_press/MOPC127.PDF
- 5 Ramarao B V, Sonal S, Mishra J K, *et al.* Development of 3 kW at 325 MHz solid-state RF power amplifier using[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, **735**: 283–290. DOI: 10.1016/j.nima.2013.09.053
- 6 Gaspar M, Pedrozzi M, Ferreira L F R, *et al.* A compact 500 MHz 4 kW solid-state power amplifier for accelerator applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, **637**: 18–24. DOI: 10.1016/j.nima.2011.02.057
- 7 Jain A, Hannurkar P R, Sharma D K, *et al.* Design and characterization of 50 kW solid-state RF amplifier[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2012, **4**: 595–603. DOI: 10.1017/S175907871200061X
- 8 徐兴福. ADS2008 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 191
XU Xingfu. ADS2008 RF circuit design and simulation examples[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 191
- 9 Pozar D M. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 微波工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 67
Pozar D M. ZHANG Zhaoyi, ZHOU Lezhu, WU Deming, *et al.*, Tran. Microwave engineering[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 67
- 10 Grebennikov A. 张玉兴, 赵宏飞, 译. 射频与微波功率放大器设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 100
Grebennikov A. ZHANG Yuxing, ZHAO Hongfei, Tran. RF and microwave power amplifier design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 100