

长脉冲相对论速调管放大器 杂频振荡的分析与抑制

黄 华, 罗 雄, 雷禄容, 罗光耀, 张北镇, 金 晓

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川省绵阳市 919 信箱 1015 分箱, 621900)

摘 要: 分析了 S 波段长脉冲相对论速调管放大器(RKA)输出微波杂频振荡和功率波形包络振荡的主要根源, 采用粒子模拟程序对 RKA 电子束尺寸和阻抗、群聚距离、输出腔有载 Q 值、引导磁场、注入微波等参数的调节, 有效抑制了杂频振荡. 根据分析结果开展了相应的实验研究, 得到了较好的实验结果, 输出微波由 300MW 提高到 540MW, 脉宽由 50ns 提高到 120ns, 辐射微波重复频率 20Hz, 束流转换效率 30%, 杂频振荡得到了有效抑制.

关键词: 相对论速调管; 杂频振荡; 长脉冲; 脉冲缩短

中图分类号: TN122 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1473-05

Analysis and Suppress of Multi-frequency Oscillation on Long Pulse Relativistic Klystron Amplifiers

HUANG Hua, LUO Xiong, LEI Lu-rong, LUO Guang-yao, ZHANG Bei-zhen, JIN Xiao

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: The main reasons of output microwave multi-frequency oscillation on S-band long pulse Relativistic Klystron Amplifiers were analyzed in this paper. Multi-frequency oscillation of RKA was suppressed evidently with PIC after some modifications on electron beams, bunching length, loaded Q-value of output cavity, and leading magnetic field. According to the PIC results the long pulse RKA experiment was developed and a favorable experimental result was obtained, which the output microwave power increased from 300MW to 540MW, the output microwave pulse width increased from 50ns to 120ns. The efficiency was about 30%, the operation repetition was 20Hz.

Key words: relativistic klystron amplifiers; multi-frequency oscillation; long pulse; pulse shortening

1 引言

现在, 已有多种微波器件能够产生大于 1GW 的高功率微波(HPM)输出^[1], 相对论速调管放大器(RKA)是其中的一种. 作者进行了多年的 S 波段 RKA 研究, 短脉冲获得了大于 3GW 的输出微波功率^[2], 长脉冲获得了大于 300MW 的输出微波功率^[3], 由于 RKA 输出微波幅度和相位稳定, 所以它是 HPM 功率合成的首选器件. 但是, 几乎在所有 HPM 器件研究中, 都遇到了不同程度的脉冲缩短问题^[1], 该问题遏止了 HPM 器件更高功率和更高能量的输出, 放大器型 HPM 器件还遇到了杂频振荡、幅度不稳定等问题, 直接阻碍了 HPM 放大器的推广和应用. 脉冲缩短和杂频振荡的机理非常复杂^[1], 不同微波器件、不同束流脉宽所表现的问题和机理不尽相同, 而且, 在高频、长脉冲 HPM 器件中该问题更加突出. 本文采用粒子模拟方法, 分析了造成 S 波段长脉冲 RKA

杂频振荡、输出微波幅度不稳定的主要根源, 通过对器件参数的优化设计, 使该问题得到了较大程度的减轻, 并开展了相应的实验研究.

2 电子束调制的模拟

根据脉冲缩短机理分析结果和提出的抑制措施^[4], S 波段 RKA 的 3 个谐振腔采取了参差模式设置, 输入腔采用 $5\lambda/4$ 的工作模式, 中间腔采用 $\lambda/4$ 的工作模式, 输出腔采用 $3\lambda/4$ 的工作模式. 采用的电子束参数为: 电压 600kV, 束流 5kA, 电子束前沿 5ns, 引导磁场强度 1T. 输入腔耦合孔注入微波幅度 25kV, 微波频率 2.85GHz. 电子束吸收微波功率波形如图 1 所示. 从模拟结果可以看出, 注入 RKA 输入腔的微波几乎全部被电子束吸收, 输入腔不存在反射微波问题; 注入 RKA 的微波功率约 200kW 时, 电子束经过输入腔间隙后可以产生近 10%

的基波调制深度,调制束流频谱很纯,调制束流波形也很平坦,不存在杂频振荡问题。

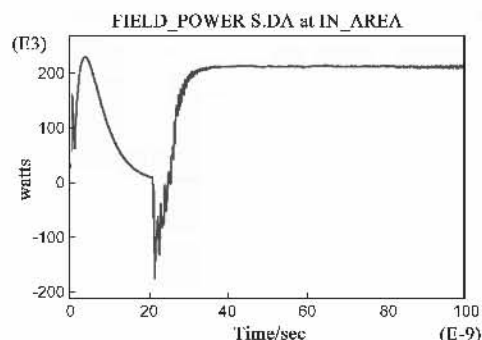


图1 电子束经过输入腔间隙后的微波吸收波形

在输入腔间隙后束流调制的最大位置放置中间腔间隙,对电子束经过 RKA 中间腔间隙后的调制情况进行了模拟,调制束流波形和频谱如图 2 所示,电子束的群聚相位图如图 3 所示。从图 2 和图 3 可以看出,电子束经过中间腔间隙后产生了很强的调制束流,基波调制束流强度在中间腔间隙后 18cm 处达到最大值 4.5kA,调制深度达 90%,从调制束流频谱可以看出,基波调制不存在边带杂频调制,调制束流波形包络也比较平坦。从电子的动量分布图可以看出,电子束经过两个谐振腔的调制后达到了很好的群聚状态,没有电子反射现象存在。

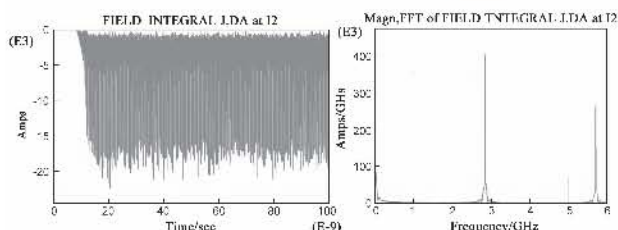


图2 电子束经过中间腔间隙后的调制束流波形(左)和频谱(右)

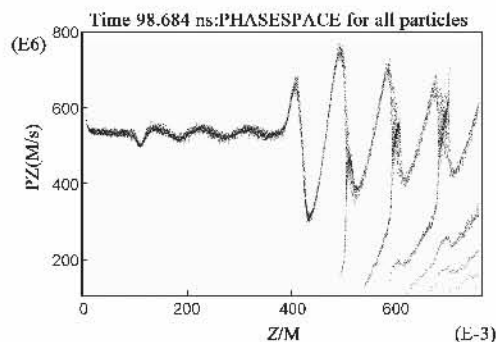


图3 电子束群聚相位图

3 微波提取的粒子模拟分析与优化

3.1 输出腔的模拟

采用粒子模拟程序,单独对 RKA 输出腔的冷腔特性和微波提取情况进行了分析和模拟,模拟结果如图 4 所示。其中,注入束流的基波调制深度 90%。从图 4 可

以看出,输出微波波形包络很平坦,频谱也很纯,输出微波功率 880MW,束波转换效率 29%。

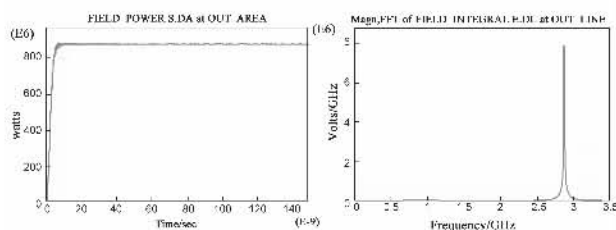


图4 RKA输出腔的输出微波功率(左)和电场频谱(右)

3.2 杂频振荡的分析

束流经过输入腔和中间腔间隙后产生了 90% 的基波调制束流深度,随后,在中间腔间隙后束流调制的最大位置放置输出腔间隙,采用粒子模拟程序进行了 RKA 整管的微波提取模拟。输出微波功率波形和电场频谱如图 5 所示。从图 5 可以看出,虽然整管 RKA 产生的最大微波功率达到 870MW,效率约 29%,但是,输出微波功率波形包络受到了调制,调制频率约 50MHz。从输出微波电场频谱可以看出,在输出微波主频两边出现了两个频率,分别为 2.837GHz 和 2.925GHz。显然,输出微波包络调制正是两个边频产生的。同时,模拟中监测了电子的动量分布图、输入腔的注入微波功率波形等参数的变化情况,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,有少部分电子发生了反射,从输入腔耦合孔有最大功率 1.3MW 的输出微波。另外,输出腔的瞬态电压幅度达到 610kV,三个谐振腔间隙电场都存在与输出微波相同的杂频振荡频率。在长脉冲 RKA 实验中,同样观察到了输入腔有较大幅度的反射微波和电子反轰腔体的痕迹^[3],波形如图 7 所示。

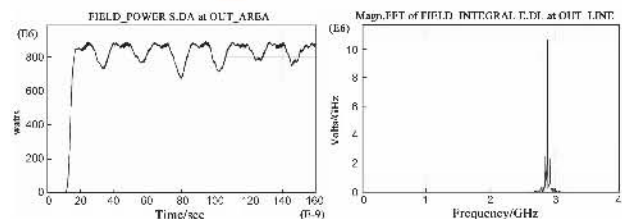


图5 RKA初始模拟输出微波波形(左)和电场频谱(右)

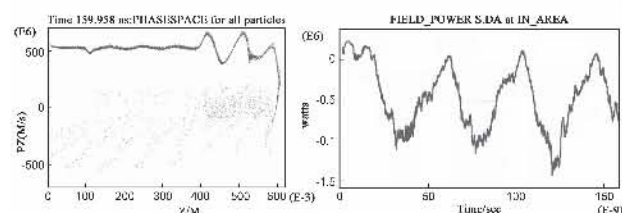


图6 RKA相位分布图(左)和输入腔反射微波功率(右)

综合上述现象可以推断,输出腔间隙电压太高造成了电子反射,反射电子经过中间腔间隙后产生了调制和群聚,经过输入腔间隙时激励了微波从输入腔耦合孔输出。显然,该束波相互作用机理类似于反射速调管

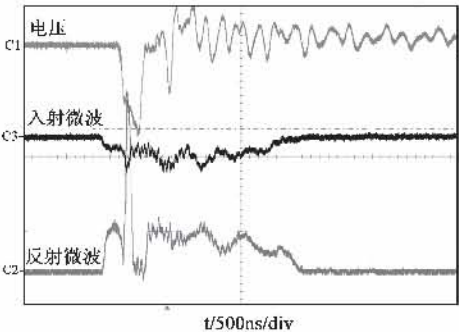


图7 长脉冲RKA注入微波实验波形

振荡器机理^[6],RKA 中反射电子激励了自激振荡,振荡的频率主要与谐振腔频率、谐振腔之间的距离、反射电子的能量和数量有关.当适当改变腔间距离,杂频调制频率会发生一定的改变,在后面的参数调节中可以看到.单独模拟输出腔时没有观察到反射电子和杂频振荡现象,而整管模拟时发生了反射电子和杂频振荡显现,这主要是因为整管模拟时电子能散比较大,容易造成电子反射.

3.3 杂频振荡的抑制

针对上述自激振荡根源,只要调节 RKA 参数,降低输出腔的间隙电压,减少或抑制反射电子数量,可以减小或抑制杂频振荡.为此,采用粒子模拟程序,对 RKA 各个腔体间的漂移距离、输出腔的有载 Q 值、环形电子束尺寸、二极管阻抗、注入微波功率幅度和频率、引导磁场等参数进行了广泛的调节,通过某些参数的调节和组合,使杂频振荡现象得到了较大程度的抑制,主要结果如表 1~表 3 和图 8 所示.

表 1 RKA 输出微波参数随电子束尺寸的变化情况

电子束外- 内径/cm	输出功率 /MW	杂波频率 /GHz	输出 微波包络	备注
2.4-2.2	600-870		不平坦	波形分为两块
2.4-2.0	840	/	平坦	
2.4-1.9	805	/	平坦	
2.3-2.0	729-770		较平坦	

表 2 RKA 输出微波参数随引导磁场强度的变化情况

引导磁场 强度/T	输出功率 /MW	杂波频率 /GHz	输出微波 包络	备注
1.4	724-909	频谱纯	不平坦	
1.0	778-874	2.931	不平坦	
0.9	804-907		不平坦	
0.8	807-841		较平坦	
0.7	800	/	平坦	无反射微波

从表 1 可以看出,增大环形电子束的厚度或让电子束远离漂移管壁,可以减轻杂频振荡的幅度,输出微波包络可以达到比较平坦,电子束厚度为 4mm 时比较理想,这主要是因为降低了电子束与谐振腔间隙电场的耦合效率,电子束密度的减小降低了空间电荷效应对电子动能减小的影响,使电子不容易发生反射现象,这

种途径抑制杂频振荡比较明显,当然这种途径也会造成 RKA 的输出微波功率和效率有所下降,效率从 30% 下降到 28%;从表 2 可以看出,适当降低引导磁场强度,可以减轻杂模振荡的幅度,这主要是因为降低磁场后不利于来回反射电子的传输;适当调节电子束的电压和束流,也可以减轻杂模振荡的幅度,输出微波包络可以达到比较平坦,总的趋势是电子束阻抗偏低一点 ($100\Omega\sim120\Omega$) 好一些,电压 580kV~500kV 和束流 5.2kA~4.0kA 范围输出微波包络都比较平坦,杂频幅度也较小.

表 3 RKA 输出微波参数随电子束电压和束流强度 (电子束阻抗) 的变化情况

电压/kV, 束流/kA	阻抗 / Ω	输出功率 /MW	杂波频 率/GHz	输出微 波包络	备注
650,4.6	141	571-875	频谱纯	不平坦	反射 2.3MW
600,4.5	133	744-809	2.937 小	较平坦	反射 165kW
550,5	110	670-760	2.95 小	较平坦	反射 90kW
550,4	137	630-670		较平坦	无反射微波
500,4	125	600	/	平坦	

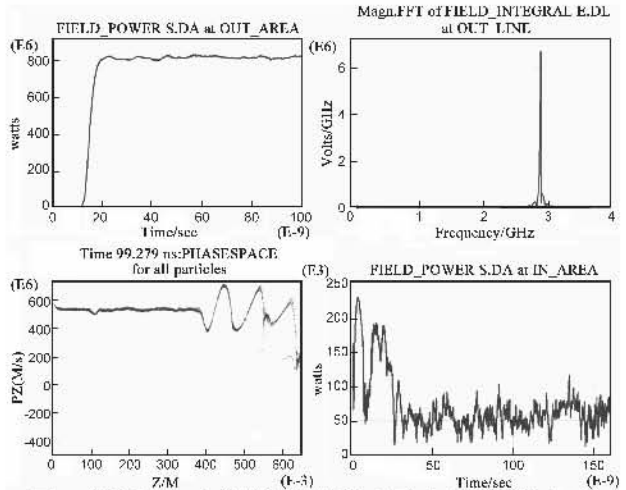


图8 长脉冲RKA改进后的输出微波波形(左上)、频谱(右上)、动量图(左下)和注入微波波形(右下)

另外,模拟中对输出腔的有载 Q 值、工作频率和注入微波功率等参数也进行了调试,模拟结果发现,增大输出腔的耦合孔尺寸、降低输出腔的有载 Q 到 8,可以使输出微波包络平坦,杂频振荡得到抑制.不过,实验中研究有载 Q 值低于 10 的输出腔非常困难.降低注入微波的功率,可以减轻杂模振荡的幅度,注入微波 45kW 时,杂模振荡基本得到抑制,输出微波也没有明显降低,达到 820MW,波形如图 8 所示.从图 8 可以看出,此时基本上不存在反射电子,输入腔也不存在反射微波输出.

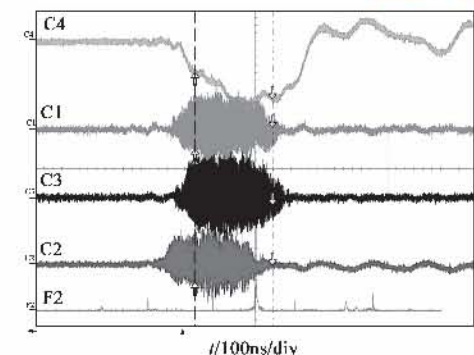
4 实验研究

根据上述优化设计结果,采用长脉冲螺旋线加速器产生的电子束源,开展了 S 波段长脉冲 RKA 的实验研究,经过多次参数调试和实验分析,使调制束流和辐

射微波功率幅度和脉宽有了较大提高,杂频振荡和脉冲缩短问题得到了较大程度的抑制.下面分节介绍.

4.1 束流调制

实验系统布局和二极管结构与文[3]基本相同,采用无箔空心石墨阴极从长脉冲加速器引出了 480kV/3.8kA 的电子束.电子束经过输入腔间隙后,产生约 100A/220ns 的基波调制束流,在输入腔间隙后束流调制的最大位置放置腔长 $\lambda/4$ 的中间腔,此时基波调制束流达到 1kA/200ns,基波调制深度 26%,显然该基波调制束流比较低,需进一步增强束流的调制深度,为此在第一个中间腔间隙后束流群聚的最大位置再放置一个腔长 $5\lambda/4$ 的中间腔,实验中发现,调制束流强度虽然增大到了 3kA,但是调制束流脉宽缩短比较严重,只有约 80ns,尽管粒子模拟中没有发现束流脉冲缩短问题.为此,作者对工作频率以及漂移群聚的距离进行了大量的实验调节,具体的参数调节与文[3]基本相似,最后找到一种比较理想的中间腔结构和漂移距离的组合,使束流脉冲缩短问题得到比较明显的抑制,同时束流达到比较强的调制深度,波形如图 9 所示,调制束流脉宽从 80ns 增宽到 150ns,调制束流强度约 3.5kA,调制深度约 90%.



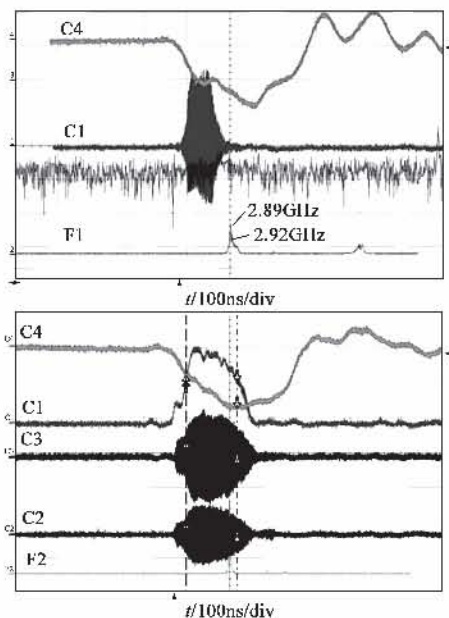
(C1-C3—不同漂移距离的群聚束流波形,F2—相应通道信号的频谱,C4—电压)

图9 束流经过中间腔后产生的调制束流波形

4.2 微波辐射

在调制束流达到比较理想的情况下,在中间腔后束流调制最大位置接上输出腔、后面并接上模式转换器和辐射喇叭,采用开口喇叭阵列对辐射微波进行测量.初次辐射微波波形如图 10(上)所示,实验中遇到了辐射微波杂频振荡和脉冲缩短问题,除了主频 2.89GHz 的信号外,还产生了 2.92GHz 的杂频振荡信号,微波幅度约 300MW,脉宽约 50ns,监测输入腔的反射微波发现,输入腔产生了较大幅度的反射微波输出,波形如图 7 所示.显然,实验中遇到了与粒子模拟中相似的杂频振荡和脉冲缩短问题,输出腔产生了反射电子,激励了杂频振荡和反射微波,造成了脉冲缩短问题.为此,根据粒子模拟提出的抑制措施和优化调节结果,调节了阴极尺寸和电子束的群聚长度、二极管阻抗、微波源频

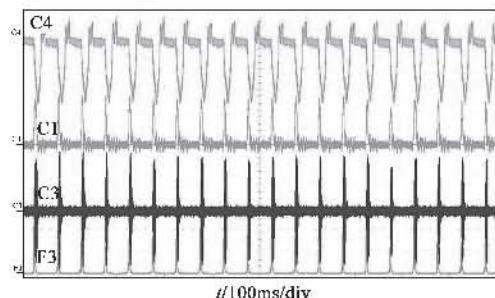
率和功率以及引导磁场强度等参数,通过对以上参数的优化调节和组合,当电子束电压 520kV、束流 3.5kA、环形电子束厚度 4mm、引导磁场 0.8T、注入微波功率约 100kW、中间腔后束流群聚长度为 18cm 时,辐射微波的杂频振荡幅度得到了较大程度的抑制,微波脉宽和幅度得到了较大程度的提高,微波功率达到 540MW,脉宽大于 120ns,束波转换效率约 30%.波形如图 10(下)所示.



(C1-C3—空间不同角度的辐射微波波形,F1-F2—相应通道信号的频谱,C4—电压)

图10 长脉冲RKA改进前(上)后(下)的辐射微波波形

在单次稳定运行的基础上,开展了 RKA 重复频率稳定运行的实验研究,重复频率 20Hz 的波形如图 11 所示.从不同重复频率实验可知,重复频率比较低时,加速器输出电压稳定,辐射微波也相当稳定,当提高加速器重频时,输出电压变得有一点不稳定,辐射微波也不稳定,其中一两炮幅度有所降低.重复运行频率 20Hz 时,RKA 辐射微波功率大于 500MW,脉宽约 120ns.



(C1、C3—空间不同角度的辐射微波波形,F3—相应通道信号的频谱,C4—电压)

图11 RKA重频20Hz运行时的辐射微波波形序列

5 小结

采用粒子模拟程序,分析了 S 波段长脉冲 RKA 产生

输出微波杂频振荡和功率波形包络振荡的主要根源是反射速调管机理:输出腔间隙电场幅度太高造成了电子反射,反射电子激励了杂模振荡.该现象得到了粒子模拟和实验的证实.通过对 RKA 电子束尺寸和阻抗、输出腔有载 Q 值、引导磁场、注入微波功率等参数的调节,有效抑制了 RKA 的杂频振荡,为实验调试提供了参考.粒子模拟优化调试结果表明,采用厚度较大的环形电子束、降低输出腔的有载 Q 值、降低注入微波功率、采用适当低的引导磁场强度和电子束阻抗,可以减轻杂模振荡的幅度,输出微波包络可以达到比较平坦,同时得到了实验的证实,得到了较好的实验结果,输出微波达到 540MW、120ns,重复频率 20Hz,束波转换效率约 30%.

参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High-Power Microwave Sources and Technologies[M]. New York:IEEE, 2001.
- [2] 于爱民,黄华,雷禄容,等.相对论速调管放大器高功率运行的初步研究[A].四川省电子学会高能电子学专业委员会第五届学术交流会论文集 vol.10[C].宁夏银川, 2007. 10:83 - 87.
Yu Ai-min, Huang Hua, Lei Lu-rong, et al. Progress on high power RKA[A]. Fifth HEEC proceedings, Yinchuan, Ningxia, vol.10[C]. 2007. 83 - 87. (in Chinese)
- [3] 黄华,范植开,等. S 波段长脉冲相对论速调管放大器的实验研究[J].强激光与粒子束, 2006, 18(6):990 - 994.
Huang Hua, Fan Zhi-kai, et al. Progress on a S-band long pulse relativistic klystron amplifier[J]. High power laser and particle beams, 2006, 18(6):990 - 994. (in Chinese)
- [4] 黄华,范植开,谭杰.相对论速调管放大器束流脉冲缩短

的研究[J].物理学报, 2004, 53(4):1129.

Huang Hua, Fan Zhi-kai, TAN Jie. Investigations on beam current pulse shortening in a long relativistic klystron amplifier [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4):1129. (in Chinese)

- [5] 谢家麟,赵永祥,著.速调管群聚理论[M].北京:科学技术出版社, 1960.

Xie Jia-ning, Zhao Yong-xiang. Bunching Theory on Klystron [M]. Beijing: Science and Technology Publish House, 1960. (in Chinese)

- [6] Friedman M. Self-modulation of an intense relativistic electron beam[J]. J. Appl. Phys., 1984, 56(9):2459 - 2474.

作者简介:



黄 华 男, 1970 年 10 月出生于重庆合川, 博士, 研究员, 现在中国工程物理研究院应用电子学研究所微波技术研究中心工作, 主要从事高功率微波源研究工作, 获部级科技进步二等奖 5 项, 三等奖 3 项, 在国内外期刊发表论文 20 余篇, 合作专著一本.

E-mail: hhua0457@163.com



罗 雄 男, 1979 年 9 月出生于四川乐山, 博士, 助研, 现在中国工程物理研究院应用电子学研究所微波技术研究中心工作, 主要从事高功率微波器件研究工作.

E-mail: luo_xiong@hotmail.com