第 27 卷 第 6 期
1998 年 12 月

电 子 科 技 大 学 学 报
Journal of UEST of China

Vol. 27 No. 6
Dec. 1998

3 cm 相对论返波管的 MAGIC 模拟 * *

文光俊 * * 李家胤 刘盛纲
（电子科技大学高能电子所 成都 610054）

【摘要】 运用全电磁的相对论的 $2\frac{1}{2}$ 维粒子模拟程序 MAGIC 模拟分析了 3cm 相对论返波管中注波互作用的非线性过程，得到了器件微波输出功率、转换效率、工作频率、工作模式等参数，模拟结果与实验数据吻合较好。

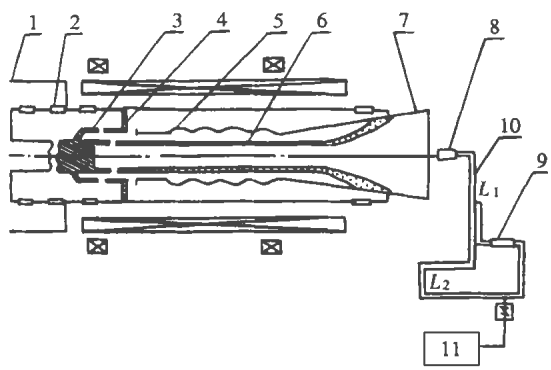
关 键 词 相对论返波管； 高功率微波； 粒子模拟； MAGIC 程序
中图分类号 TN136； TN128

近 20 年来，峰值功率在 100 MW 以上的高功率微波源研究得到了迅速的发展，目前仍是一个很活跃的研究领域[1]。相对论返波管（RBWO）是最早研制成功的强相对论微波源器件，同时也是很有应用前景、功率最大的器件之一[2,3]。

本文用引进的全电磁相对论 $2\frac{1}{2}$ 维粒子模拟程序对 3cm 相对论返波管进行了模拟研究，得出模拟结果。

1 RBWO 实验

3cm 相对论返波管实验系统如图 1 所示。其慢波线是一段圆柱对称的波纹波导，左端接过截止缩小波导，右端是兼做收集极的输出喇叭，电子枪和慢波结构一道置于螺线管磁场中。由电子枪发射的高能电子注沿引导磁场注入慢波结构内，注中空间电荷波同结构中的负一次空间谐波同步耦合，导致电子注群聚和交出动能，由固有的内反馈机制在器件内激励起微波振荡。受激产生的微波经过截止波导的反射，仍从喇叭辐射出去，而工作过的电子注最后散开来打在收集极上。



1. 加速器外筒 2. 电阻 3. 阴极 4. 阳板
5. 高频系统 6. 电子注 7. 输出喇叭
8. 测量喇叭 9. 衰减器 10. 色散线 11. 示波器
图 1 3 cm 相对论返波管的实验系统

实验系统的主要部分有：1）脉冲电子加速器：工作电压 0.4 ~ 1.0 MV，束流 10 ~ 20 kA，脉宽 70 ns；2）脉冲磁场：脉冲螺线管磁场的最大场强为 2 ~ 3 T，上升时间 2.7 ms 左右，脉宽 5 ms；3）电子枪：能提供平均半径 $r_b \approx 7$ mm，厚度约 1 mm 的环形电子注；4）高频系统是一段弱波纹波导，其中一

* 1997 年 7 月 11 日收稿，1998 年 9 月 7 日修改定稿
* 国家科委 863 高科技项目，基金号：863.410.7.2
* * 男 34 岁 讲师 在站博士后

种结构的波纹周期 $Z_p=1.95$ cm，波纹平均半径 $r_b=1.26$ cm，波纹扰动幅值 $h=0.3$cm；5）测试系统。

3 cm 相对论返波管初步实验结果：器件在 450 keV，1.8 kA，$r_b\approx 7$ mm 的环形电子注驱动下，经输出喇叭辐射出中心频率为 9.3 GHz，峰值功率达 100 MW 的微波，工作模式为 TM_{01} 模式[4]。

2 MAGIC 程序

MAGIC 程序是一种全电磁相对论 $2\frac{1}{2}$ 维粒子模拟程序[5]，现广泛用于设计和研究相对论微波器件。MAGIC 程序从最基本的电磁运动和力学运动规律出发，采用时域有限差分方法，对完整的 Maxwell 方程组和 Lorentz 方程组

$$\nabla\times \vec{B}(\vec{r},t)=\varepsilon\frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t}+\vec{j}(\vec{r},t)$$

$$\nabla\times \vec{E}(\vec{r},t)=-\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\nabla\cdot \vec{E}(\vec{r},t)=\frac{\rho(\vec{r},t)}{\varepsilon}$$

$$\nabla\cdot \vec{B}(\vec{r},t)=0$$

$$\frac{\partial \vec{P}(\vec{r},t)}{\partial t}=q\{\vec{E}(\vec{r},t)+\vec{V}(\vec{r},t)\times \vec{B}(\vec{r},t)\}$$

$$\nabla\cdot \vec{j}(\vec{r},t)+\frac{\partial \rho(\vec{r},t)}{\partial t}=0$$

进行自洽的数值求解，从而可以模拟出电荷粒子和电磁场相互作用的时间非线性演化过程，式中 $\vec{p}(\vec{r},t)$，$\vec{V}(\vec{r},t)$ 为电荷粒子的动量和速度。

MAGIC 程序算法的思想是从设置的边界条件和初始条件开始，对初始态的大量电荷粒子统计平均求出空间电荷和电流，再由完整的 Maxwell 方程组计算出空间的电磁场，由 Lorentz 公式求出每个电荷粒子在电磁场作用下的加速度、速度以及由此产生的空间位移和速度变化，得到电荷粒子新的空间分布和速度分布，由此循环，跟踪计算出大量电荷粒子的运动轨迹和电磁场的时间演化过程，最后对这些微观电荷粒子的有关物理量进行统计平均，得到宏观系统的性质和运动规律。

用 MAGIC 分析相对论返波管，使其成为研究与设计该类器件的有力工具，还需要做大量的工作，其中涉及到：1）器件结构边界条件的处理；2）系统初始状态的设置；3）空间步长，电磁时间步长，程序算法中控制参数的选择；4）计算的数据后处理。对相对论返波管进行 MAGIC 模拟，必须正确地解决上述问题，MAGIC 模拟才能顺利进行和模拟出器件中的真实物理过程。

3 3 cm 相对论返波管的 MAGIC 模拟及结果

我们开发运用引进的 MAGIC 程序，对实验的 3 cm 相对论返波管进行了模拟分析。

MAGIC 模拟模型如图 2 所示。腔体材料都是理想良导体，这意味着模拟器件的品质因素 Q 较实际值偏高，从而影响模拟的微波辐射功率和上升过程，为消除这个影响，我们采用了一种算法（该算法为消除高频数值噪声，对一切频率信号都进行适当的人为衰减处理，对低频信号衰减量小些，对高频信号衰减量大些，衰减系数是可调参数），首先模拟冷腔模型的 Q 值，调节衰减参数，使模拟的 Q 值和实验测出的 Q 值相符，这样就确定出了后续热腔模拟中使用的衰减常数。

模拟使用了与实验一致的束流和束压参数，阴极导体发射的环形电子注的内半径为 6.5 mm，

外半径为 7.5 mm，电子数密度在整个阴极环形发射面上是均匀的。慢波线结构参数全同于实验参数。过截止波导半径设置为 8.7 mm，引导磁场分布类似于实际螺线管磁场，仅有的 z 和 r 方向分量可用下式表示

$$B_z(r,z)=\frac{B_0}{(1+e^{(z-z_b)/z_a})}$$

$$B_r(r,z)=\frac{B_0}{2z_a}r\frac{e^{(z-z_b)/z_a}}{(1+e^{(z-z_b)/z_a})^2}$$

式中　$B_0=2$ T，调节 z_b、z_a 参数以保证废电子打在输出喇叭上。

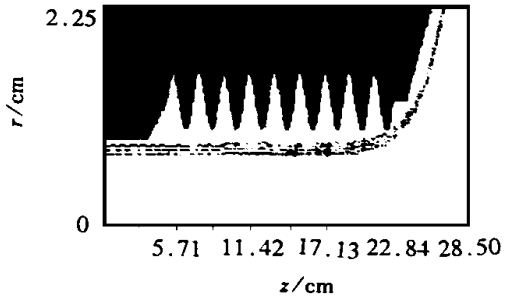
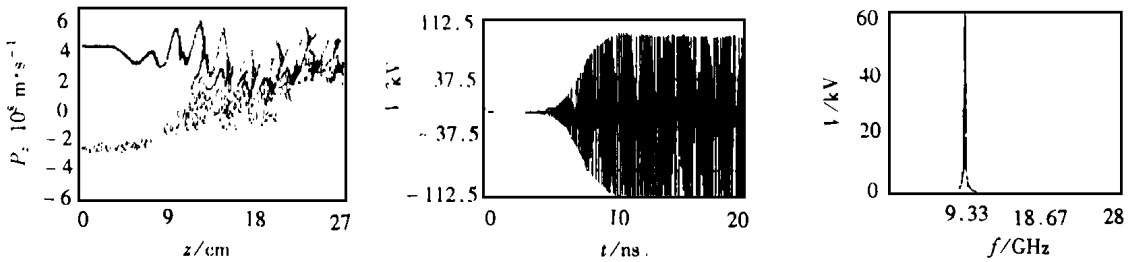


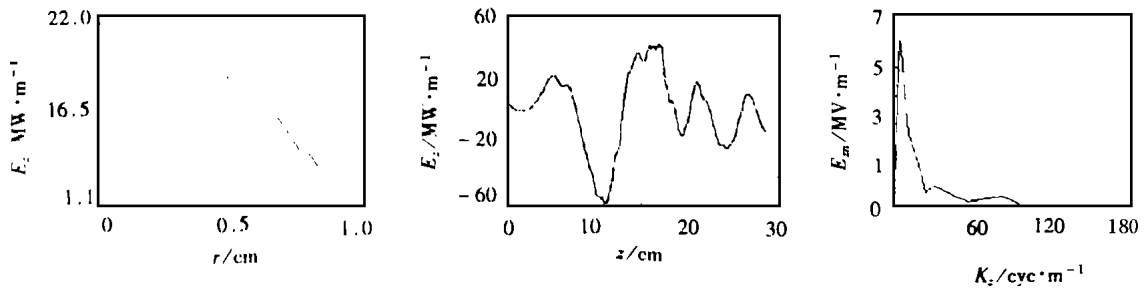
图 2　RBWO 的 MAGIC 模拟模型

3 cm 相对论返波管 MAGIC 的模拟结果：在 20 ns 时刻，电子轴向动量 γV（γ 为电子的相对论因子）沿 z 的分布，波纹波导中第一个周期段上，1/4 周期长度间隙间高频电压的时间曲线，如图 3a、3b 所示。从图 3 可见，约 4 ns 时刻，注波互作用不稳性开始了，高频电压随时间按指数规律增长，约 10 ns 时刻达到饱和，高频信号幅值存在一种调制现象，这来源于输出端不匹配，波纹波导两端存在反射的影响；电子群聚位置和电子动量局部极小值对应（见图 2），表明群聚电子是处于减速高频场相位；电子群聚周期约为波纹周期的 1.2 倍，反映了与注电子相互作用的 TM_{01} 模式中负一次谐波波长约为 2.4 cm；对高频电压的时间曲线进行傅里叶变换，得到注波互作用受激辐射的频谱分布如图 3c 所示。从图 3c 可见，微波振荡的主频为（9.15±0.03）GHz，与实验测定的频率较好地吻合。高频电压频谱中约 18 GHz 的振荡分量是来源于群聚电子激发的 2 倍于主频的信号。



(a)　电子轴向动量 γV 沿 z 的分布　　(b)　高频电压的时间曲线　　(c)　高频电压的傅里叶频谱

图 3　电子轴向动量分布和高频电压时间曲线及幅频特性



(a)　高频场 E_z 沿 r 的分布（$z=6$ cm）　　(b)　高频场 E_z 沿 z 的分布（$r=0.1$ cm）　　(c)　E_z 的空间谐波谱

图 4　高频场 E_z 的空间分布及空间谐波谱分布

为确定注波互作用受激辐射微波的模式，我们在高频信号饱和后一个时刻 $t=20$ ns，抽样高频场 E_z 分量沿 r 的分布，结果如图 4a 所示。E_z 在对称轴位置有最大值，结合辐射频率和线性理论计

算的色散曲线得出器件中电子注是与腔中的 TM_{01} 模式场发生互作用的。E_z 沿轴向 z 的分布如图 4b 所示。对 E_z 沿 z 分布作傅里叶变换，得到 E_z 的空间谐波幅值 E_{zn} 分布，结果如图 4c 所示，可见 E_z 中主要含有基波和负一次空间谐波两个分量，二者波长分别为 11.08 cm 和 2.4 cm。

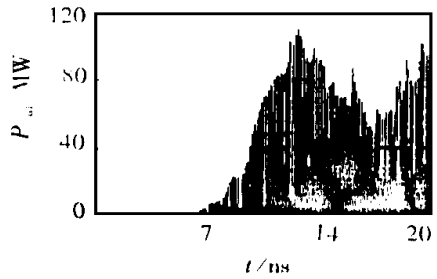


图 5 输出窗口截面上功率流的时间曲线

对输出窗口截面进行功率流积分，得到截面上辐射功率 P_{out} 的时间分布如图 5 所示，从图 5 可见，器件经输出喇叭辐射的功率峰值约 110 MW，这与实测结果吻合，峰值功率效率为 12%。

我们已对器件输出功率与慢波线结构参数、引导磁场和电子注径向位置的依赖关系进行了模拟和优化，结果表明：通过调整束流径向位置，引导磁场强度等参量可进一步提高器件的输出功率和转换效率。

4 结束语

我们开发运用 MAGIC 软件，在正确处理了 3 cm 相对论返波管的边界条件、初始状态设置和算法中可调衰减参数的选择下，成功地模拟出器件中注波互作用的非线性物理过程，得到了器件的输出功率、工作频率等非线性参数，模拟结果与实验数据吻合较好。我们正在运用 MAGIC 程序来优化设计高效率相对论返波管等高功率微波源器件。

参 考 文 献

1 Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanare V I *et al*. Relativistic multiwave cerenkov generator. IEEE Trans Plasma Science, 1990, 18(3): 525～536

2 Leifeste G T, Earley L M, Swegle J A *et al*. Ku-band radiation produced by a relativistic backward wave oscillator. J Appl Phys, 1986, 59(4): 1 336～1 378

3 文光俊，李家胤，熊祥正等. 相对论返波振荡器研究进展. 电子科技大学学报，1996，25(增1)：140～149

4 李家胤，于善夫，孙嘉鸿等. 3cm 相对论返波管实验研究. 强激光与粒子束，1992，4(2)：269～276

5 Goplen B, Ludeking L, Smithe D. MAGIC User's manual. MRC Report, 1996

MAGIC Simulations of A 3cm Relativistic Backward Wave Oscillator

Wen GuangJun Li Jiayin Liu Shenggang

(Inst. of High Energy Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A two and one half dimensional full-electromagnetic relativistic particle simulation code MAGIC is used to simulate the nonlinear process of beam-wave interaction in a 3cm relativistic backward wave oscillator. The device performance parameters such as operating frequency, power efficiency and radiation power are obtained. Particle simulation results are in good agreement with the experimental data.

Key words high power microwave; relativistic backward wave oscillator; particlle simulation; MAGIC code

编辑 徐培红