

# 同轴 Super-Reltron 的物理分析和数值模拟\*

杨郁林 丁 武

(北京应用物理与计算数学研究所强辐射实验室, 北京8009信箱, 100088)

**摘 要** 对同轴 Super-Reltron 进行了物理分析和数值模拟, 在调制腔电压125kV、加速间隙电压600kV 和电流15kA 时, 在 C 波段获得了峰值功率约2.5GW 和效率约25% 的结果, 都较以前大大提高。计算表明频率与箔的高度成反比。在电流达到空间电荷极限以前, 微波输出功率和电流的平方成正比。

**关键词** 高功率微波 同轴 Super-Reltron PIC 方法

**中图分类号** TN 752 502

众所周知, Super-Reltron 具有如下特点<sup>[1,2]</sup>: (1) 电子束在调制腔中被完全群聚; (2) 用后加速减小相对能散度; (3) 用多腔输出避免击穿, 所以它可以产生具有极高效率的高功率微波脉冲; (4) 因为在这种调制腔中的箔有聚焦特性, 不需要引导磁场, 结构重量和尺寸比较小; (5) 输出腔是矩形波导, 直接输出基模  $TE_{10}$ , 无需模转换器。因此它在 HPM 器件中具有很强的竞争能力。目前实验上得到的最好结果是: 在 L 波段, 峰值功率为600MW, S 波段只有45MW<sup>[2]</sup>, 没有一个完整的 Super-Reltron 数值模拟结果。由于普通 Super-Reltron 电流受空间电荷极限的限制, 要进一步提高 Super-Reltron 电流很困难, 因而功率的提高受到限制, 工作频率提高也受到尺寸限制。

普通的 Super-Reltron 采用同轴结构。这是因为: (1) 同轴 Super-Reltron 增大了功率容量; (2) 空间电荷极限提高, 可以允许传输较大的电流; (3) 同轴结构的  $Q$  值较低, 同样的功率容量输出功率较大; (4) 可以提高工作频率。我们用同轴 Super-Reltron 在 C 波段理论上获得了超过2.5GW 的峰值功率, 在 L 波段和 S 波段则会更高。

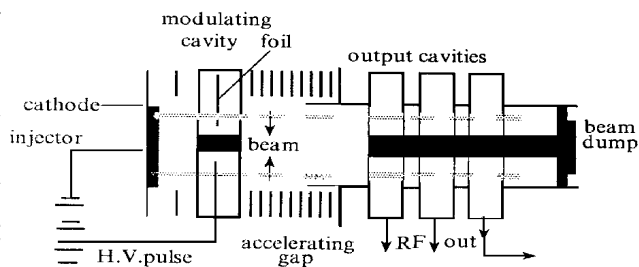


Fig. 1 Schematic diagram of a coaxial Super-Reltron

图1 同轴 Super-Reltron 示意图

## 1 Super-Reltron 和微波产生机理<sup>[5]</sup>

同轴 Super-Reltron 由调制腔、后加速腔以及提取腔组成, 在调制腔中放入一个金属箔。由于要求腔体内的微波场强不大于150kV/cm、加速电压不超过200kV/cm, 对阴阳极之间的距离、后加速间隙以及调制腔间隙都有特殊的要求。Super-Reltron 的电子束群聚是在同轴 Split-Cavity-Oscillator<sup>[3]</sup>调制腔(简称同轴 SCO)中进行的, 调制腔的箔与壁之间仅允许均匀

\* 国家863激光技术领域资助课题  
1997年12月29日收到原稿, 1998年4月8日收到修改稿。  
杨郁林, 男, 1971年1月出生, 硕士, 助研

的驻波轴向电场存在。SCO 中的TM 模分为 $2\pi$ 模和 $\pi$ 模两种, 只有 $\pi$ 模与电子束相互作用是不稳定的<sup>[4]</sup>。

电磁场与通过调制腔的一部分电子束相互作用得到迅速放大, 电子束通过调制腔需要的时间  $t_c \approx 0.1\text{ ns}$ , 而电子束脉冲时间  $\tau \approx 1\ \mu\text{s}$ , 因此电磁场与电子束约有 $10^4$ 次相互作用机会。事实上, 在调制腔通过了电子束一小部分后, 电磁场由于增长很快而饱和, 饱和发生在跨越每个间隙的 RF 峰值电压近似等于电子束电压的时候。饱和场可以在短距离内使电流接近空间电荷极限的电子束达到群聚, 群聚时某一谐波电流超过直流。已充分群聚的电子束, 进入辐射腔时在短距离内就以超辐射形式发射微波, 受激辐射几乎为零, 因而不需要外加磁场导引电子束传播。但电子束群聚达到最大值时, 感生的能散度也达到最大, 利用后加速提高电子束整体能量, 从而减小相对能散度, 并且在后加速过程中群聚保持不变。这样就可以提高效率  $\eta$  (因为  $\Delta E/E$  减小) 和功率  $P$  (因为  $\eta$  和  $v$  都增大,  $P = \eta IV$ )。

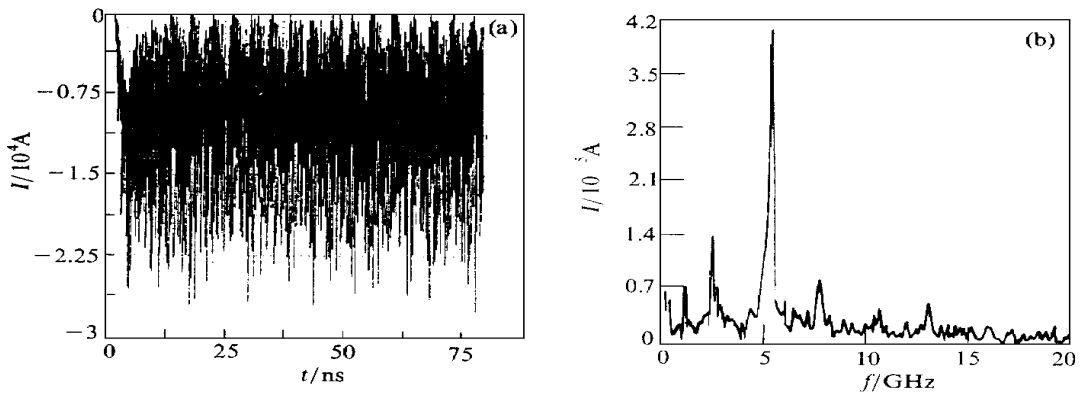


Fig 2 Time history of the work (a) and the Fourier spectrum (b)

图2 电流随时间变化图(a)与电流傅立叶频谱图(b)

## 2 计算结果与分析

所采用的二维相对论全电磁PIC方法通过求解满足所有腔体边界条件的麦克斯韦方程组来自洽地考虑了电子束的空间电荷效应。计算时用到轴对称边界条件、 $3 \times 10^4$ 个时间步以及约 $10^4$ 个网格, 时间步长为 $2.5\text{ ps}$ , 外加电压模型为

$$V(t) = 0, t < 0; \quad V(t) = (t/t_0)V_m, 0 < t < t_0; \quad V(t) = V_m, t > t_0 \quad (1)$$

式中,  $t_0, V_m$  分别是上升时间和最大电压值。计算采用的上升时间为 $5\text{ ns}$ , 在C波段, 阴阳极之间最大电压为 $125\text{ kV}$ , 后加速最大电压为 $600\text{ kV}$ 。

### 2.1 电子运动与调制

对进入输出腔的电流作频谱分析并计算其电流调制系数, 图2给出了电流随时间变化及其傅立叶频谱图。调制系数定义为电子束调制电流的一阶谐波分量与其直流分量的比率  $\alpha = I_1/I_0$ 。

电流调制系数与腔的结构和尺寸、电子束的电压、电流等因素都有关。在C波段, 由于频率增高, 箔的高度减小, 而加速间隙不能太小, 电子束聚焦不好, 因而调制系数比低频情况的低。在C波段调制系数最高只达到80%, 而在L波段和S波段都超过了100%。由图3(a)可以看出, 箔对电子有很好的聚焦作用。

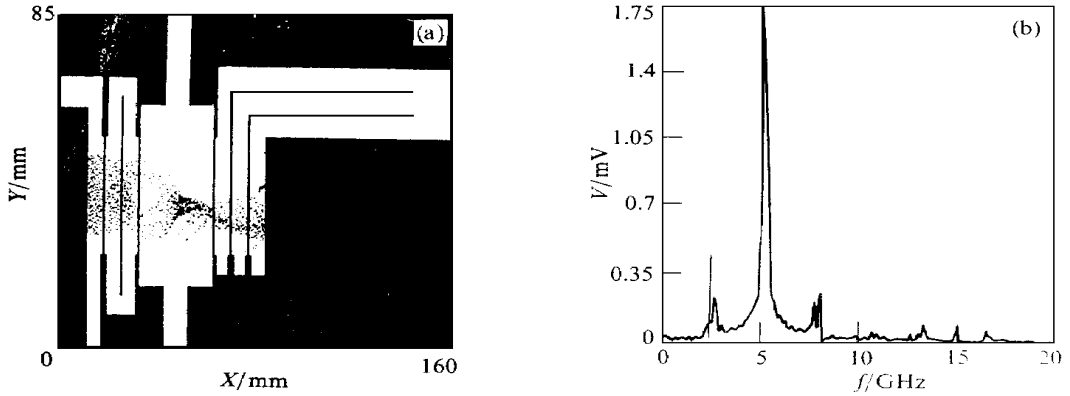


Fig 3 Plots of the electronic trajectories (a) and the Fourier spectrum of signal (b)

图3 电子在  $t = 5\text{ns}$  时的轨迹图(a)与傅立叶频谱分析(b)

### 2.2 微波产生及输出

在发射电流为12kA 时, 整个系统的电磁场储能在  $t = 12\text{ns}$  时达到饱和, 射频(RF) 在输出口处  $V_r(t) = \int_{r_1}^{r_2} \delta E_r(z, r, t) dr$  也随时间变化, 饱和幅值约300kV。由图3(b) 可以看出在  $f = 5.2\text{GHz}$  处有一个明显的峰, 它对应于输出频率。

通过输出窗口的微波功率由通过该窗口的波印廷矢量的面积分计算得到, 见图4, 峰值功率是波印廷矢量周期平均后取最大平均值。影响微波输出功率的因素主要有电流、电压的大小, 电流调制系数, 电子的传输系数, 提取腔匹配等因素。表1给出了调制腔电压为125kV, 后加速腔电压600kV, 调制腔的内半径为8mm、外半径为68mm, 器件总长度为160mm 时不同电流的计算结果。

由表1可以得到以下结论: 随着电流的改变, 在电流还未达到空间电荷极限的时候, 在  $5.8\text{kA} \sim 12.0\text{kA}$  电流范围内输出功率与电流平方成正比, 这与文献[5]的结论是一致的。储能也随着电流的增大而增大, 电流超过空间电荷极限以后, 储能基本保持不变。在电流特别大时, 由于电流超过空间电荷极限, 有许多电子被返回, 效率和功率反而降低。电流特别小时由于起振困难, 电子束未达到充分群聚, 也不满足与电流平方成正比的关系。

表1 改变电流的数值模拟结果

Table 1 Numerical simulation vs work current

	$I/\text{kA}$	$\alpha$	$E/\text{J}$	$f/\text{GHz}$	$P_{\text{out}}/\text{GW}$	$\eta/\%$	$P_{\text{out}}/I^2$
A	17.7	0.39	4.4	5.1	2.65	21	9
B	15.2	0.55	4.5	5.2	2.82	26	12
C	12.0	0.64	4.7	5.2	1.94	22	14
D	10.5	0.48	4.3	5.3	1.65	22	15
E	8.6	0.48	3.8	5.3	1.06	17	14
F	7.2	0.60	3.5	5.3	0.74	14	14
G	5.8	0.61	3.4	5.4	0.51	12	15
H	4.8	0.63	3.2	5.4	0.29	8	12

$\alpha$ - Current modulation factor;  $E$ - RF field energy.

### 2.3 频率随空间结构的变化

我们研究了空间结构变化对热腔工作频率的影响。虽然电流、电压的改变能引起频率变化,但是变化较小。计算表明影响频率变化的主要因素是调制腔中箔的高度。由表2可以看出,工作频率与箔的高度成反比。在计算中为了使调制腔和输出腔匹配,输出腔的轴向间隙长度与调制腔轴向间隙长度保持一致。

表2 频率随调制腔中箔的高度变化

Table 2 The frequency vs the height of foil in modulating cavity

	$H_{\text{foil}}/\text{cm}$	$f/\text{GHz}$	$f \cdot H_{\text{foil}}$
I	18	1.45	26.1
J	12	2.3	27.6
K	10	2.6	26.0
L	7.2	3.5	25.2
M	5	5.2	26.0
N	4.6	5.9	27.1

综上所述,对 Super-Reltron 作了改进,用同轴 SCO 作为其调制腔,计算数值表明,它大大提高了输出功率和频率,在调制腔电压 125kV,加速间隙电压600kV 和电流15kA 时,在 C 波段获得了约 2.5GW 峰值功率和约 25% 效率的数值结果。在电流达到空间电荷极限以前,微波输出功率和电流的平方成正比。另外,频率与箔的高度成反比。

### 参考文献

- 1 Miller Bruce R, et al Super-Reltron theory and experiments *IEEE Trans Plasma Sci*, 1992, **20**: 332
- 2 Miller Bruce R, et al Recent advances in Reltron and Super-Reltron HPM source development *SPIE Intense Microwave Pulses II*, 1994, **2514**: 99
- 3 Marder Barry M, et al The Split-cavity oscillator: a high power e beam modulator and microwave source *IEEE Trans Plasma Sci*, 1992, **20**: 312
- 4 Lemko Raymond W, dispersion analysis of symmetric transverse magnetic modes in a split cavity oscillator *J Appl Phys*, 1992, **72**: 4422
- 5 丁武 Super-Reltron 的微波产生机理, *物理学报*, 1997, **46**(11)

## COAXIAL SUPER-RELTRON PHYSIC ANALYSIS AND NUMERICAL SMULATION

Yang Yulin, Ding Wu

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, High Power Radiation Laboratory, P. O. Box 8009, Beijing, 100088, China*

**ABSTRACT** A new coaxial-structure Super-Reltron was explored to develop a low-impedance high power microwave tube. This source will have a power output of about 2.5GW with 25% efficiency at 5.2GHz, input modulate voltage is 125kV and post-accelerating voltage is 600kV. Numerical simulations show that the frequency is approximately inversely proportional to the length of screen, and the scaling of output power is proportional to  $I^2$ , when the current is less than the space charge limit.

**KEY WORDS** high power microwaves, coaxial Super-Reltron, PIC Simulation

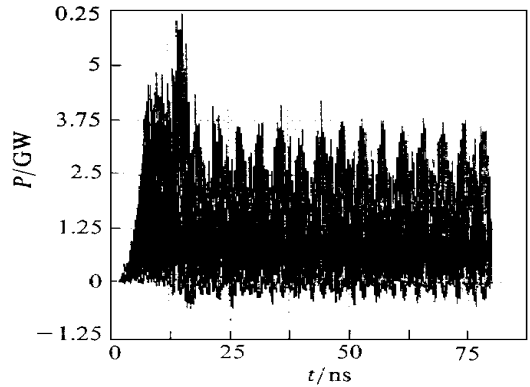


Fig 4 Ranging Poynting from time history of the output power  
图4 波印廷矢量随时间变化图