

## 变阻抗相对论返波管的研究\*

文光俊<sup>1)</sup> 李天明<sup>1)</sup> 李家胤<sup>2)</sup> 谢甫珍<sup>1)</sup> 刘盛纲<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>电子科技大学高能电子学研究所, 四川, 成都, 610054;

<sup>2)</sup>中国人民解放军后勤工程学院, 重庆, 400016)

**摘要** 根据相对论返波管(RBWO)的非线性理论, 数值模拟了耦合阻抗单步跃变型 RBWO 效率与束流参量、耦合阻抗跃变位置、高低耦合阻抗比值的依赖关系, 结果表明器件最优化效率可达到 50%, 设计制造了一个 X 波段高功率耦合阻抗单步跃变型 RBWO, 运用全电磁粒子模拟程序仿真了器件中波束相互作用过程, 预见出器件功率、效率、频率等性能参量. 在电子注电流、注加速电压、相互作用区长度相同的实验条件下, 测得变阻抗器件实验效率约为均匀阻抗型器件效率的 2 倍.

**关键词** 高功率微波, 相对论返波管, 粒子模拟, 注束相互作用.

## RELATIVISTIC BACKWARD OSCILLATOR WITH VARIABLE COUPLE IMPEDANCE\*

WEN Guang-Jun<sup>1)</sup> LI Tian-Ming<sup>1)</sup> LI Jia-Yin<sup>1)</sup>

XIE Fu-Zhen<sup>2)</sup> LIU Sheng-Gang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

<sup>2)</sup>Logistical Engineering Institute, PLA, Chongqing 400016, China)

**Abstract** The dependence of efficiency of a single-step couple impedance jump-variation relativistic backward wave oscillator(RBWO) on the relativistic electron beam parameters, couple impedance jump-change position and high-low couple impedance ratio was analyzed and optimized numerically by means of self-consistent RBWO nonlinear theory presented in the paper. The results show that the optimal device efficiency can be up to 50%. A high-power X-band RBWO with a single step change in the couple impedance was designed and analyzed by using a full electromagnetic particle-in-cell code to simulate the device output power, efficiency and operating frequency. It was also constructed and investigated experimentally. The efficiency of the device with a single-step change in the couple impedance is about twice of the uniform case in the same driving electron beam, beam-wave interaction region length and other operating conditions has been achieved in the preliminary experiments.

**Key words** high power microwave, relativistic backward wave oscillator, particle simulation, beam-wave interaction.

### 引言

相对论返波管(Relativistic Backward Wave Oscillator-RBWO)是当今同一波长下功率最高的器件之一<sup>[1]</sup>. 进一步提高相对论返波管效率和输出功率, 对拓展相对论返波管在军用和民用两方面的应用均有非常现实的意义. 提高相对论返波管的效率有两种主要途径: 一种是在注波相互作用区填充等离子体改善电子束的聚束与换能状态, 这类器件最高

效率已达 40%<sup>[2]</sup>; 另一种途径是采用非均匀慢波结构, 通过改变注波耦合阻抗或同步波相速来提高微波产生效率. 耦合阻抗单阶跃变型器件实验效率已达到 35%<sup>[3]</sup>, 耦合阻抗多阶跃变型器件效率达到 30%, 输出功率达到 500MW<sup>[4]</sup>.

本文采用经典相位模型<sup>[5]</sup>, 建立起分析非均匀慢波结构相对论返波管的自治非线性理论, 在分析模型中计算了慢波结构两端口对电磁波的反射效应, 正向波基波与注电子的非同步相互作用效应及电子注的空间电荷效应, 推导的 RBWO 非线性理论较

\* 国家 863 计划基金(批准号 863.410.7.2)资助项目  
稿件收到日期 2001-05-22, 修改稿收到日期 2002-01-31

\* The project supported by the National High-Technology Foundation of China (No. 863.410.7.2)  
Received 2001-05-22, revised 2002-01-31

文献[6]更加完善和符合器件工作实际情况.对耦合阻抗单阶跃变型器件效率与束流特性参数、耦合阻抗分布的关系进行了数值分析.设计制作了一个 X 波段高功率耦合阻抗单步跃变型相对论返波管,对器件性能进行了全电磁粒子模拟程序仿真和实验研究,并对数值模拟结果、粒子模拟结果和实验结果进行了对比分析.

### 1 相对论返波管的非线性理论

非均匀慢波结构相对论返波管物理结构如图 1 所示.慢波线为一段长  $L_{\text{int}}$  的非均匀波纹波导,其壁半径  $r_w$  沿  $Z$  轴逐段周期扰动.在建立相对论返波管的非线性理论过程中假设:(1) 电子注是半径为  $r_b$  的单能无限薄空心注,受无限强磁场引导,仅与慢波结构中  $TM_{01}$  模式波相互作用.(2) 慢波结构左右端口处对电磁波的复反射率分别为  $\rho_L$  和  $\rho_r$ ,  $\rho_L = \rho_{L0}e^{i\Phi_r}$ ,  $\rho_r = \rho_{r0}e^{i\Phi_r}$ .电子注与能流沿负  $z$  方向传播的  $TM_{01}$  模式波(反向波)中负一次空间谐波(同步波)发生同步相互作用,与截止颈口反射反向波形成的群速沿正  $Z$  向的  $TM_{01}$  模式波(正向波)中基波发生异步相互作用.(3) 注波相互作用是弱相互作用.

从有源 MAXWELL 方程、电子运动方程出发,经推导得到分析 RBWO 中注波相互作用过程的大信号工作方程组<sup>[7]</sup>:

$$\frac{da_0(\xi)}{d\xi} = -I_0 j_{n-1}^2(r_b) \int_0^{2\pi} e^{-i\Psi_1(\xi, \Psi_{s0})} d\Psi_{s0}, \quad (1)$$

$$\frac{da_{-1}(\xi)}{d\xi} = \frac{2\gamma_0^3 e I R_{c-1}(r_b) K_{-1}^2}{m\omega^2 \pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\Psi_1(\xi, \Psi_{s0})} d\Psi_{s0}, \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_0(\xi, \Psi_{s0})}{d\xi} = 2\gamma_0^2 \left[ \frac{W_\xi}{\sqrt{W_\xi^2 - \gamma_0^2}} - \frac{K_{-1}}{K} \right], \quad (3)$$

$$\Psi(\xi=0, \Psi_{s0}) = \Psi_0 \in [0, 2\pi]$$

$$\frac{d\Psi_0(\xi, \Psi_{s0})}{d\xi} = 2\gamma_0^2 \left[ \frac{W_\xi}{\sqrt{W_\xi^2 - \gamma_0^2}} - \frac{K_0}{K} \right], \quad (4)$$

$$\Psi_0(\xi=0, \Psi_{s0}) = \Psi_{s0} + \Phi_0 \in [0, 2\pi + \Phi_0]$$

$$\frac{d\Psi_\xi(\xi, \Psi_{s0})}{d\xi} = R_e \{ a_{-1}(\xi) e^{i\Psi_1(\xi, \Psi_{s0})} + a_0(\xi) e^{i\Psi_0(\xi, \Psi_{s0})} - i \sum_{n=1}^{\infty} q_n e^{in\Psi_1(\xi, \Psi_{s0})} \},$$

表 1 耦合阻抗单阶跃变型 RBWO 的最佳工作参数及效率

Table 1 The optimal operating parameters and efficiency of a RBWO with a single-step change in the couple impedance

模型	束流参数		$R_{c-1}^{loc}$	$R_{c-1}^{as}$	$\xi_K$	$\xi_{int}$	$\eta(\%)$
	电流 $I/kA$	电压 $V_{\text{acc}}/kV$					
$\rho_L = 0, \rho_r = 0$	2.0	620	0.2	4.0	2.85	4.71	49.5
$q_m = 0$	3.0	500	2.0	4.0	3.519	4.21b	39.7

$$W_\xi(\xi=0) = 1 \quad (5)$$

$$a_{-1}(\xi = \xi_{\text{int}}) e^{-ik\xi} = \frac{2\gamma_0^2}{K_0^2} f_{n-1}(r_b) = a_0(\xi = \xi_{\text{int}}) \rho_r e^{-iK_0 \frac{2\gamma_0^2}{K} \xi_{\text{int}}}, \quad (6)$$

$$a_0(\xi=0) = f_{-1}(r_b) \rho_L a_{-1}(\xi=0). \quad (7)$$

式中  $\xi = \frac{\omega z}{2\gamma_0^2 c}$ ,  $a_{-1,0}(\xi) = \frac{2\gamma_0 e}{m\omega} E_{z-1,0}(r_b, \xi)$ ,

$$W_\xi(\xi) = \frac{W}{\gamma_0 m c^2}, I_\xi = \frac{2\gamma_0^3 e I K_{-1}^2 R_{c-1}(r_b)}{m\omega^2 \pi}, q_m =$$

$$\frac{4I_e}{m c \gamma_0 v_{z0}^2} n T_0(n K_{-1} r_b) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{im\Psi_1(\xi, \Psi_{s0})} d\Psi_{s0}, K =$$

$\frac{\omega}{c}$ ,  $E_{z-1}(r_b, z)$  和  $E_{z0}(r_b, z)$  分别为同步波和正向波基波幅值的空间分布,  $K_{-1}$  和  $K_0$  分别是同步波和正向波基波的轴向相位常数,  $f_{n-1}(r_b)$  为冷慢波波导中正向波基波与同步波的幅值比,  $I$  为电子注电流,  $\Psi, \Psi_0$  分别为注电子相对于同步波和正向波基波的相位,  $W$  为电子的能量,

$$T_0(K_{-1} r_b) = \frac{I_0(K_{-1} r_b)}{I_0(K_{-1} r_w)} \left[ \begin{aligned} &K_0(K_{-1} r_b) I_0(K_{-1} r_w) \\ &- K_0(K_{-1} r_w) I_0(K_{-1} r_b) \end{aligned} \right],$$

$I_1(x), K_0(x)$  为第一、第二类修正贝塞尔函数,

$$K_{-1}^2 = K_{-1}^2 - \frac{\omega}{c}, \gamma_0$$

为注电子的初始相对论因子.注波相互作用有效性用电子效率  $\eta$  来衡量

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\gamma_0(1 - W_\xi(\xi = L_{\text{int}}, \Psi_{s0})) d\Psi_{s0}}{\gamma_0 - 1} \quad (8)$$

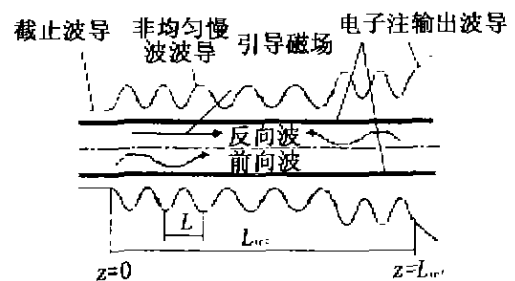


图 1 相对论返波管结构图

Fig. 1 Physical configuration of RBWO

## 2 数值模拟

本文应用四阶 Rounge-kutta 法数值求解式(1)~式(7)RBWO 工作方程组.首先在  $\rho_L = \rho_r = 0$  下,结合我校 3cmRBWO<sup>[8]</sup>慢波结构尺寸,电子注平均半径等参数,保持电子注加速电压  $V_{ak} = 500\text{kV}$  不变,对该均匀阻抗型器件的最佳化作用区长度  $\xi_{\text{opt}}$ ,最佳化工作电流  $I_b^{\text{opt}}$  进行了模拟分析,得到  $I_b^{\text{opt}} \approx 2\text{KA}$ ,  $\xi_{\text{opt}} \approx 4.3$ ,最佳化效率约 20%.对耦合阻抗单步跃变型 RBWO 性能进行数值分析,目的在于寻找这类器件效率与同步波耦合阻抗分布之间的规律性关系.设耦合阻抗单步跃变型 RBWO 同步波耦合阻抗  $R_{c-1}(\tau_b, \xi)$  在  $\xi_K$  位置发生跳变,由低耦合阻抗  $R_{c-1}^{\text{low}}$  跃变为高耦合阻抗  $R_{c-1}^{\text{high}}$ .在不同  $R_{c-1}^{\text{low}}$  值下,我们对器件效率与  $R_{c-1}^{\text{low}}/R_{c-1}^{\text{high}}$ 、 $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  的依赖性进行了仿真和优化,表 1 为计算得到的耦合阻抗单步跃变型 RBWO 最佳工作参数及互作用效率.当互作用区总长度发生变化时,各优化参数亦将相应变化.

$V_{ak} = 620\text{kV}$ ,  $I = 2\text{KA}$ ,  $R_{c-1}^{\text{low}} = 0.2\Omega$ ,  $R_{c-1}^{\text{high}} = 4.0\Omega$ ,  $\xi_{\text{int}} = 4.71$ ,数值模拟出注电子相对同步波的相位,电子的归一化能量  $W_\xi$  随归一化作用区位置  $\xi$  的变化规律见图 2(a)、(b).从图 2 可见,在低耦合阻抗相互作用区内,电子注受高频场作用,实现了速度调制和密度群聚,在电子群聚比较好,群聚中心的电子相对于同步波的相位为减速相位的空间位置处,同步波耦合阻抗被跃变式加大,使进入高耦合阻抗相互作用区的群聚电子与同步波的耦合作用得到加强,导致电子交出了更多的动能(与均匀器件相比),同时因电子的速度被迅速降低,其相对于同步波的相位随空间距离的变化率趋缓,电子进入同步波加速相位区的速度变慢,注电子与同步波的有效作用长度较均匀器件有所加长,故变阻抗 RBWO 注波相互作用效率比均匀器件高.

通过数值计算耦合阻抗单步跃变型 RBWO 效

率与  $R_{c-1}^{\text{low}}$ 、 $R_{c-1}^{\text{high}}$ 、 $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  的关系,得到了一些规律性知识:(1) 在给定  $R_{c-1}^{\text{low}}$ 、 $R_{c-1}^{\text{high}}$  及互作用长度下,器件效率对耦合阻抗的跃变位置  $\xi_K$  变化比较敏感,当  $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  相对优化参数值有 20% 变化时,器件效率迅速下降.(2) 当  $R_{c-1}^{\text{low}}$  降低时,  $R_{c-1}^{\text{low}}/R_{c-1}^{\text{high}}$ 、 $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  将变大,器件效率增大;当  $R_{c-1}^{\text{low}}/R_{c-1}^{\text{high}}$  很高时,  $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  趋于 1;当  $R_{c-1}^{\text{low}}$  较大时,  $R_{c-1}^{\text{low}}/R_{c-1}^{\text{high}}$  允许的取值范围较窄,  $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  变小.(3)  $R_{c-1}^{\text{low}} \in (0, 12)\Omega$ ,  $R_{c-1}^{\text{high}}/R_{c-1}^{\text{low}} \in (1, 20)$ , 耦合阻抗跃变最佳位置  $\xi_K/\xi_{\text{int}}$  落在  $(0.4 \sim 0.85)$  区间,器件最优化效率将在 27 ~ 50% 之间.

## 3 粒子模拟

结合我校电子加速器性能指标,我们设计出一个 X 波段大功率耦合阻抗单步跃变型 RBWO,并运用粒子模拟程序对其性能进行了模拟和优化.粒子模拟模型见图 3(a)所示,结构参数见表 2.

粒子模拟使用了下列参数,  $V_{ak} = 500\text{kV}$ ,  $I = 5.5\text{kA}$ , 环形注的外半径  $r_{k2} = 0.75\text{cm}$ , 内半径  $r_{k1} = 0.65\text{cm}$ ,  $L_{\text{cut}} = 0$ ,  $L_{\text{end}} = 1.0\text{cm}$ , 磁场分布类似于实际螺线管磁场,均匀磁场区强度  $B_0 = 25\text{kG}$ .截止波导与阴极之间边界上加上电压  $V_{ak}$ , 设置输出口为电磁波辐射边界条件.

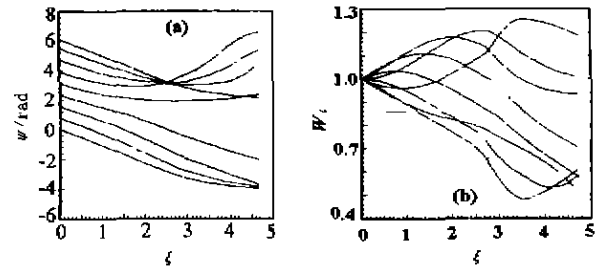


图 2 (a)注电子相对于同步波的相位随  $\xi$  变化  
(b)电子能量随  $\xi$  的变化

Fig. 2 (a) Beam electron phase relating to the synchronous wave vs. normalized axial distance  $\xi$

(b) electron energy  $W_\xi$  vs. normalized axial distance  $\xi$

表 2 X 波段变阻抗 RBWO 的结构参数

Table 2 The geometric parameters of x-band RBWO with variable couple impedance

波纹波导 类型	平均半径 $r_0/\text{cm}$	波纹幅值 $r_1/\text{cm}$	波纹周期 $L_i/\text{cm}$	波导长度/ $\text{cm}$	过截止波导		在截止颈与慢波线 之间的光滑波导		慢波线与喇叭口 之间的光滑波导	
					半径 $\text{cm}$	长度 $L_{\text{cut}}/\text{cm}$	半径 $\text{cm}$	长度 $L_{\text{cut}}/\text{cm}$	半径 $\text{cm}$	长度 $L_{\text{cut}}/\text{cm}$
低耦合阻抗 波纹波导	1.26	0.30	1.95	5	1.95					可调
高耦合阻抗 波纹波导	1.26	0.40	1.95	3	1.95	0.85	6.0	1.56	可调	1.66

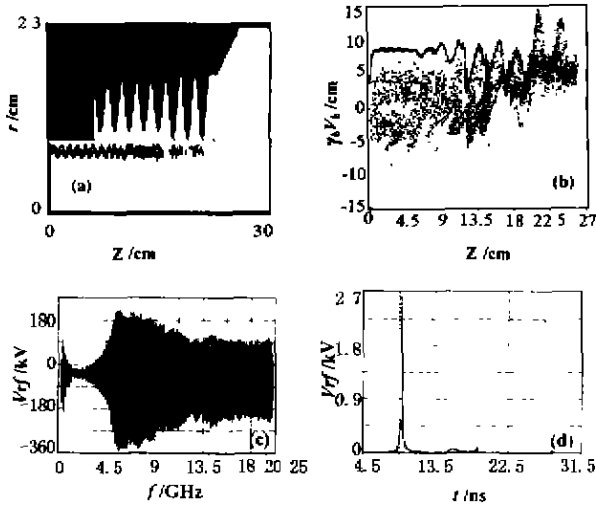


图3 (a)变阻抗RBWO模型和电子电荷密度沿Z轴的分布 (b)电子轴向动量  $\gamma v_b$  沿Z的分布 (c)高频电压的时间曲线 (d)高频电压的傅里叶频谱  
Fig.3 (a) The model of the RBWO with variable couple-impedance and distribution of the electron charge density a-long Z axis (b) distribution along Z axis of axial momentum  $\gamma v_b$  (c) the high frequency voltage vs time (d) the Fourier frequency spectrum of high-frequency voltage

在20ns时刻,抽样出第一节波纹波导上1/4周期长度间隙间( $r = 0.9\text{cm}$ )的高频电压的时间曲线及相应的频谱分布、电子轴向动量  $\gamma v_b$  沿Z分布分别见图3(c)、(d)、(b)所示,微波振荡主频为( $9.16 \pm 0.03$ )GHz. 电子注电荷密度的空间分布见图3(a),对比图3(a)和图3(b)可见:(1)电子注在低耦合阻抗相互作用区尾部附近已获得了较好的群聚,表明低耦合阻抗段的作用是使电子注产生预群聚;(2)群聚电子进入高耦合阻抗相互作用区域时,这些群聚电子相对于高频场的相位为减速相位,它们与高频场相互作用和交出能量给高频场.在低、高耦合阻抗作用区内  $z = 8.1\text{cm}$  和  $z = 15.91\text{cm}$  处抽样高频场轴向分量  $E_z$  沿  $r$  的分布,得到器件工作模式为  $TM_{01}$ . 抽样  $E_z$  沿  $z$  的分布( $r = 0.2\text{cm}$ ),得到  $E_z$  中主要成份为基波和负一次谐波,二者的波长分别为  $6.94\text{cm}$  和  $2.89\text{cm}$ .

观测输出窗口截面上辐射功率的时间分布得到器件微波峰值功率约为800MW. 峰值功率效率达到30%,比数值模拟结果  $\eta = 39.7\%$  低些. 其原因可能是:(1)耦合阻抗跃变位置相对于数值模拟中的位置有偏移;(2)数值模拟中未计及电子的三维运动,速度离散,电子注环形面上耦合阻抗非均匀性及注中空间电荷效应的影响;(3)器件相互作用区长度的选择还不够理想.

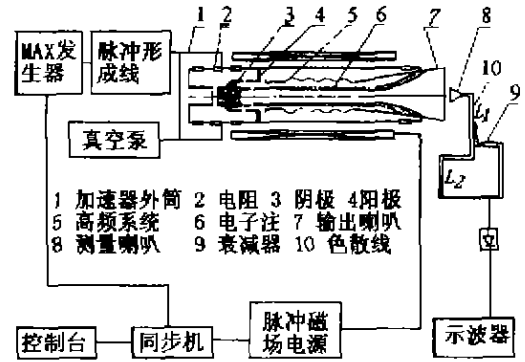


图4 RBWO的实验系统  
Fig.4 Experimental system of the RBWO

### 4 变阻抗相对论返波管实验及结果

RBWO实验系统如图4所示. 主要部分有:(1)脉冲线电子加速器. 工作电压为  $0.4 \sim 1.0\text{MV}$  可调,束流为  $10 \sim 15\text{kA}$ ,脉宽为  $70\text{ns}$  左右.(2)脉冲磁场. 电磁线圈磁场最大场强为  $2\text{Tecla}$ ,上升时间约为  $2.7\text{ms}$ ,脉宽为  $5\text{ms}$ .(3)电子枪. 采用了不锈钢冷阴极电子枪,这种冷阴极的优点是发射电流密度大,且可重复多次工作. 电子枪能提供平均半径  $r_a \approx 7\text{mm}$ ,厚度约为  $1\text{mm}$ ,电流强度为数  $\text{kA}$  的环形电子束.(4)高频系统. 是一段均匀波纹波导或者非均匀波纹波导,一端接过截止缩小波导段,另一端接输出喇叭.(5)测试系统. 加速器电压及电流分别用分压电阻与检流小电阻取样,由快速存储示波器指示. 输出喇叭辐射的微波信号被置于适当位置的测量喇叭接收后,先通过长为  $L_1$  的波导,再由  $3\text{dB}$  定向耦合器分成两路,一路经过长度为  $L_2$  的色散线,另一路则经过适当倍率的衰减,然后经双T接头重新合并为一路,经晶体检波器检波后由 TDS-540 快速存储示波器指示、记录. 色散线由  $3\text{cm}$  标准波导形成,不同频率的波在其中传播的速度不同,由两路信号的时间差和色散线的长度  $L_2$  ( $L_2 = 43\text{m}$ ) 可计算出信号的频率.

实验中变阻抗RBWO的慢波线由5个低阻抗波纹波导块和2.75个高阻抗波纹波导块组成,均匀阻抗RBWO的慢波线仅由低耦合阻抗波纹波导块组成,总长度仍为7.75个周期. 两种RBWO在相同的系统运行状态下,受相同束能、电流强度的环形电子注驱动时,都受激辐射出微波信号. 变阻抗RBWO和均匀阻抗RBWO工作时,示波器记录的微波信号波形分别如图5(a)、(b)所示. 图6(a)、(b)为示波器记录的变阻抗RBWO工作时的电压、电流波

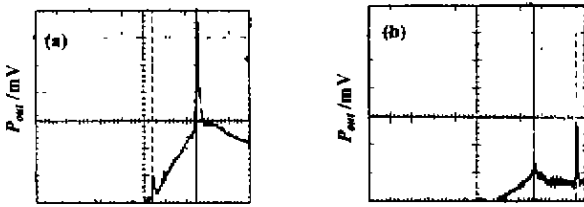


图 5 输出微波信号

(a) 变阻抗 RBWO (b) 均匀阻抗 RBWO

Fig. 5 The output microwave signal of (a) RBWO with variable Coupling-impedance (b) RBWO with uniform coupling-impedance

形. 实验测得变阻抗 RBWO 两路微波信号时间差为 214ns, 均匀阻抗 RBWO 为 204ns, 由色散线长度  $L_2$  计算出前者微波信号中心频率为 9.1GHz, 后者为 9.2GHz. 通过测量微波辐射场的空间分布得到两种 RBWO 的工作模式均为  $TM_{01}$  模式. 对比图 5(a) 和 5(b) 可见变阻抗 RBWO 的微波功率约为均匀阻抗 RBWO 功率的 2 倍, 相应前者效率约为后者效率的 2 倍.

### 5 结束语

我们在使用的分析模型更符合 RBWO 的实际

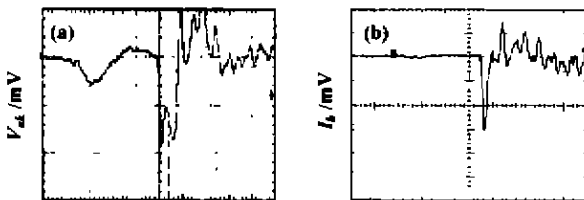


图 6 (a) 电压波形 (b) 电流波形

Fig. 6 (a) Voltage oscillogram (b) current oscillogram

工作情况下, 建立起了相对论返波管的非线性理论; 并运用该理论数值分析了耦合阻抗单步跃变型 RBWO 注波相互作用过程和性能, 得到了的器件最佳运行参数和一些规律性知识; 数值模拟, 粒子模拟及实验结果表明: 这类器件能高效率地产生高功率微波.

### REFERENCES

[1] Bugaev s p, Cherepenin V A, Kanare V I, *et al*. Relativistic multiwave Cerenkov generator *IEEE Trans PS*, 1990, **18**(3):525—536

[2] Carmel Y, Minami K, Lou W R, *et al*. High power microwave generator by excitation of a plasma-filled reppled boundary resonator. *IEEE Trans. PS*, 1990, **18**(3): 497—506

[3] EI' chaminov A S, Zagulov F Ya, Kovalev N F, *et al*. High efficient relativistic backward wave tube. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1980, **1**(6):191

[4] Morelond L D, Schamlonglu E, Lemke R W, *et al*. Efficiency enhancement of high power vacuum BWO'S using nonuniform slow wave structure. *IEEE Trans PS*, 1994, **22**(5):554—564

[5] Kovler N F, Petruhina V I, Smorgonskg A V. Ultra-relativistic carcnotron. *Radiotekhnique and Electronics*, 1975, **20**(7):263—280

[6] Levush B, Antonsen TM, Bronkorsky A, *et al*. Theory of relativistic backward wave oscillator with end reflection. *IEEE Trans. PS*, 1992, **20**(3):263—280

[7] WEN Guang-Jun, Research on high-efficiency high-power relativistic backward wave oscillator. Doctorial degree dissertation. University of Electronic Science and Technology of China(文光俊, 高效率高功率相对论返波振荡的研究博士学位论文, 中国电子科技大学), 1998

[8] LI Jia-Yin, YU San-Fu, SUN Jia-Hong, *et al*. Experimental investigation of 3cm relativistic backward wave oscillator. *High Power Laser and Particle Beam*(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