

# 等离子体填充 0.14 THz 相对论返波管模拟

王宇<sup>1)2)</sup> 陈再高<sup>2)†</sup> 雷奕安<sup>1)</sup>

1) (北京大学物理学院, 北京 100871)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2012年12月20日收到; 2013年1月21日收到修改稿)

模拟了 0.14 THz 相对论返波管中电子束与氩气相互作用产生等离子体的过程, 研究了在不同气压条件下, 等离子体对相对论返波管的输出功率、频率以及起振时间的影响. 模拟结果表明, 等离子体背景能引起太赫兹波段真空电子器件脉冲缩短, 并出现新的频率分量; 适当地注入等离子体能减少 0.14 THz 相对论返波管的起振时间, 提高器件的输出功率.

**关键词:** 太赫兹, 相对论返波管, 粒子模拟, 等离子体

**PACS:** 52.65.-y, 34.50.Gb, 07.57.Hm, 52.80.-s

**DOI:** 10.7498/aps.62.125204

## 1 引言

太赫兹辐射通常指 0.1 THz 到 10 THz 之间的电磁波, 在光谱中对应于波长从 30  $\mu\text{m}$  到 3 mm<sup>[1]</sup>. 虽然太赫兹辐射发现于 100 多年前, 但直到 20 世纪 80 年代, 随着一系列新技术和新材料的发展, 人们才开始重新认识这一波段. 基于太赫兹辐射的穿透力强等性质, 当前许多国家都在积极研究太赫兹辐射, 这将对通信、雷达、电子对抗、天文学、医学成像/无损检测、安全检查等领域有着深远的影响. 到目前为止, 仅真空电子学及等离子体电子学的方法可以产生大功率长脉冲太赫兹辐射<sup>[2,3]</sup>, 因为相对论返波管 (relativistic backward wave oscillator, RBWO) 具有高功率、高效率 and 结构简单等特点<sup>[3,4]</sup>, 本文针对 RBWO 模型开展太赫兹辐射模拟研究.

对于微波波段 RBWO, 实验表明适量的等离子体能提高 RBWO 的输出功率和效率, 最高可将输出效率提高 7—8 倍<sup>[4,5]</sup>, 并对输出频率、脉冲宽度、起振时间等有一定的影响. 对于 0.14 THz 波段的 RBWO, 西北核技术研究所开展了理论和实验研

究<sup>[6-8]</sup>, 但由于波长短, 器件结构相对精细, 生产成本更高, 如果充入等离子体能对器件的一些输出参数产生规律性影响, 就能利用这些规律提高器件性能. 目前 RBWO 加载等离子体有两种方式, 一种是向返波管中直接预填充等离子体; 另一种是在返波管内加入一定密度的中性惰性气体, 通过电子束和中性气体碰撞电离产生等离子体. 第二种方法更容易实现, 实验成本也较低. 为此本文采用第二种等离子体填充方法, 并利用粒子模拟技术研究等离子体对 0.14 THz 相对论返波管输出功率等参数的影响, 模拟结果对真空电子学太赫兹器件理论和实验研究均具有十分重要的参考意义.

本文采用 2.5 维全电磁 (二维坐标空间和三维速度空间) PIC (particle-in-cell) 粒子模拟软件 UNIPIC<sup>[9,10]</sup>. 软件能够模拟各种轴对称的高功率微波源器件, 包括 RBWO、虚阴极振荡器、磁绝缘线振荡器等. 软件采用时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 的方式推进电磁场, 采用牛顿-洛伦兹力方程描述带电粒子的运动, 并且能处理多种电磁以及带电粒子的边界条件, 软件的蒙特卡罗模块能模拟带电粒子与中性气体之间的碰撞、电离等复杂的物理过程.

† 通讯作者. E-mail: chbtmczg@163.com

## 2 电子与中性原子碰撞模拟

UNIPIC 软件实现了电子与中性原子弹性碰撞、中性原子的激发和电离碰撞、离子与中性原子之间的弹性碰撞和电荷交换碰撞等五种碰撞算法,采用查表的方式给出了多种气体的碰撞截面. UNIPIC 软件的模拟方法是在每个时间步长内采用 FDTD 方法对电磁场进行推进以及采用蛙跳方法推进粒子,实现了电磁场 CIC (cloud-in-cell) 插值、阴极电子发射和二次电子发射、蒙特卡罗碰撞 (monte-carlo collision, MCC) 方法、CIC 方法电荷/电流分配等算法.

FDTD 方法是广泛用于求解时域 Maxwell 方程的数值计算方法. FDTD 方法对电磁场  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式,每一个  $\mathbf{E}(\mathbf{H})$  场分量周围有四个  $\mathbf{H}(\mathbf{E})$  场分量环绕,用这种方式将含有时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为一组差分方程<sup>[11]</sup>. 为了减少数值计算带来的误差,空间网络尺寸一般小于电磁波长的 1/20 (本文采用网格尺寸为波长的 1/45). 空间和时间的离散间隔应满足 Courant 稳定条件:

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \quad (1)$$

其中,  $c$  为真空中的光速,  $\Delta r$  和  $\Delta z$  为空间网格步长.

在处理等离子体时, PIC 方法将等离子体看作微波传输的介质,通常假设等离子体是各向异性的电介质,介电张量由  $\boldsymbol{\epsilon}_R$  来表征:

$$\boldsymbol{\epsilon}_R = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_2 & 0 \\ -\epsilon_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_{ce}^2}, \\ \epsilon_2 &= i \frac{\omega_{ce}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_{ce}^2}, \\ \epsilon_3 &= 1 - \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$  为电磁波角频率,  $\omega_p = (n_e e^2 / \epsilon_0 m)^{1/2}$  为等离子体频率,  $\omega_{ce} = eB/m$  是电子回旋频率.

采用蛙跳方法推进粒子运动,在每个时间步长内,宏粒子的位置坐标和速度的推进间隔半个时间

步长. 这种方式可达到二阶计算精度,较为准确地模拟粒子运动.

CIC 电荷/电流分配方法是把宏观粒子和电流看作均匀的网络单元大小的粒子云或电流面,采用面积加权的方式将电荷、电流分配到正交网格上,如图 1 所示. 这种电荷守恒的电流分配方法会产生高频噪声,可采用校正算法进行修正<sup>[12]</sup>.

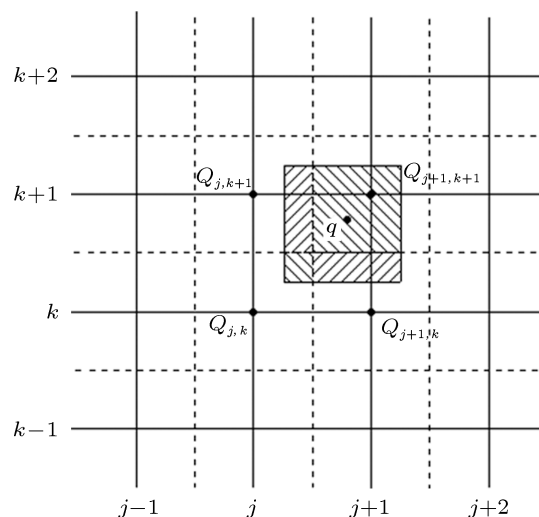


图 1 CIC 电荷分配方法示意图

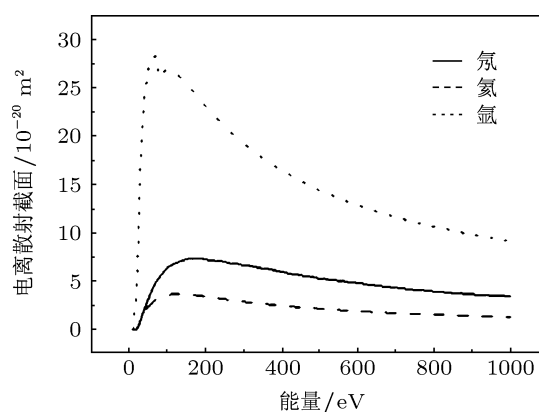


图 2 氦气、氮气和氩气电离碰撞截面随入射电子能量的变化<sup>[4]</sup>

MCC 方法是通过产生一系列随机概率与碰撞截面比较,得出粒子是否碰撞以及确定碰撞的类型,并结合能量和动量守恒等定律来确定碰撞后粒子的新状态<sup>[4]</sup>. 软件所使用的碰撞截面数据,来自国际原子能组织的核数据库<sup>[13,14]</sup>. 在 PIC 方法中,粒子推进和电磁场推进的时间步长是固定的,采用在一个时间步长内随机决定源粒子和靶粒子之间是否发生碰撞的方法来实现蒙特卡罗碰撞.

电离截面是表征碰撞并电离概率的重要物理

参数, 碰撞电离截面越大越容易碰撞电离. 预填充背景气体选择不易腐蚀器件的惰性气体, 三种常用惰性气体的碰撞电离截面随入射电子能量的变化如图 2 所示. 从图中可看出电离截面先随电子入射能量的上升先增大后减小, 随靶粒子质量数的增加而增大, 电离截面在 100 eV 左右时达到最大. 本文采用预填充氩气作为背景气体进行数值模拟研究.

### 3 太赫兹返波管模型

用 UNIPIC 软件设计的 0.14 THz RBWO 装置模型如图 3 所示. RBWO 总长为 39.08 mm, 慢波结构由 9 个周期结构组成, 慢波结构的平均半径为 0.952 mm, 周期长度为 1.0 mm, 波纹深度为 0.127 mm. 采用场致模型发射电子束, 外加磁场约为 2.8 T, 注入波电压为 300 kV, 平均电流为 2620 A, 器件的工作模式为  $TM_{01}$ . 环形电子束的内半径为 0.603 mm, 外半径为 0.635 mm.

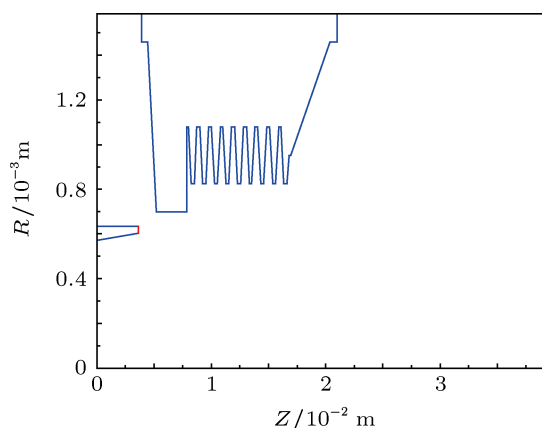


图 3 0.14 THz RBWO 结构示意图

### 4 模拟结果及分析

在太赫兹 RBWO 器件内分别预填充压强为 10, 100, 900 和 1200 Torr ( $1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$ ) 的中性氩气, 并与真空情况下的模拟结果进行比对 (见表 1). 从表 1 中可以看出, 随着背景氩气初始压强的增加, 器件的起振时间不断减少, 平均功率不断上升, 当气体密度达到 1200 Torr 时, 器件的起振时间延长. 原因是 RBWO 的工作原理就是利用电子束的绝对不稳定性 (absolute instability) 增长, 达到周期性群聚的状态进而实现起振输出. 电磁波的频率在共振频率附近存在一个微扰时, 相互作用区的

电磁场幅度以自然指数递增<sup>[15]</sup>, 如 (4) 式所示. 随着气压增加, 单位时间内产生的等离子体增加, 而随着等离子体密度的增加, 不稳定性的最大时间增长率和空间增长率均有所增加<sup>[16]</sup>. 由于碰撞产生的电子对电流有贡献, 模拟中器件中的电流也是逐渐增大的, 因此提高了器件不稳定性的增长率, 有利于器件的起振.

$$e^{-i\omega t} = e^{-i\omega' t + i\omega'' t}, \quad (4)$$

式中,  $\omega' = \omega_r - \frac{1}{2}Q^{1/3}$ ,  $\omega'' = Q^{1/3}\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $Q$  的表达式如 (5) 式所示:

$$Q = \frac{\omega_p^2 \Gamma^2 v_g \Delta r}{2\gamma_b^3 k_z} \frac{I_0(\Gamma r_b)}{\int_0^{r_0} I_0(\Gamma r) dr}. \quad (5)$$

表 1 0.14 THz RBWO 在真空和氩气背景下的结果对比

气体压强/Torr	起振时间/ns	平均功率/ $10^8$ W	输出主频/THz
0	1.40	1.18	0.143
10	1.37	1.19	0.143
100	1.34	1.25	0.143
900	1.31	1.29	0.143(0.138)
1200	1.42	1.32	0.143(0.163)

RBWO 在不同气体压强下的模拟结果如图 4 所示, 从图 4(a)—(c) 可以看出, 在预填充 900 和 1200 Torr 气压氩气时, 输出脉冲宽度明显缩短, 并且会出现新的频率分量, 如图 4(d)—(f) 所示. 压强为 1200 Torr 时的脉冲宽度比 900 Torr 时缩短更加明显, 脉冲宽度随着背景气体压强增加呈减小趋势. 器件中等离子体的频率可由 (6) 式计算:

$$\omega_p = \left( \frac{4\pi n_0 e^2}{m} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

模型中的电子密度  $n_0$  由 (7) 式计算:

$$n_0 = \frac{N \times P}{V} \approx \frac{N \times P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)L}, \quad (7)$$

式中,  $N$  为模拟中的宏粒子数,  $P$  为每个宏观粒子数包含的粒子数. 当等离子体密度为  $2.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  时, 等离子体频率  $f_p \approx f$ , 发生共振吸收, 而模拟至 6 ns 时等离子体密度约为  $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , 由于密度的不均匀性, 已开始发生局部共振吸收现象, 器件的输出开始不稳定; 模拟至 14 ns 时, 器件进入输出“截止”状态, 因为相对论电子数密度与等离子体密度相当, 不可能发生完全输出“截止”, 只会发生功率输出变得很低的现象.

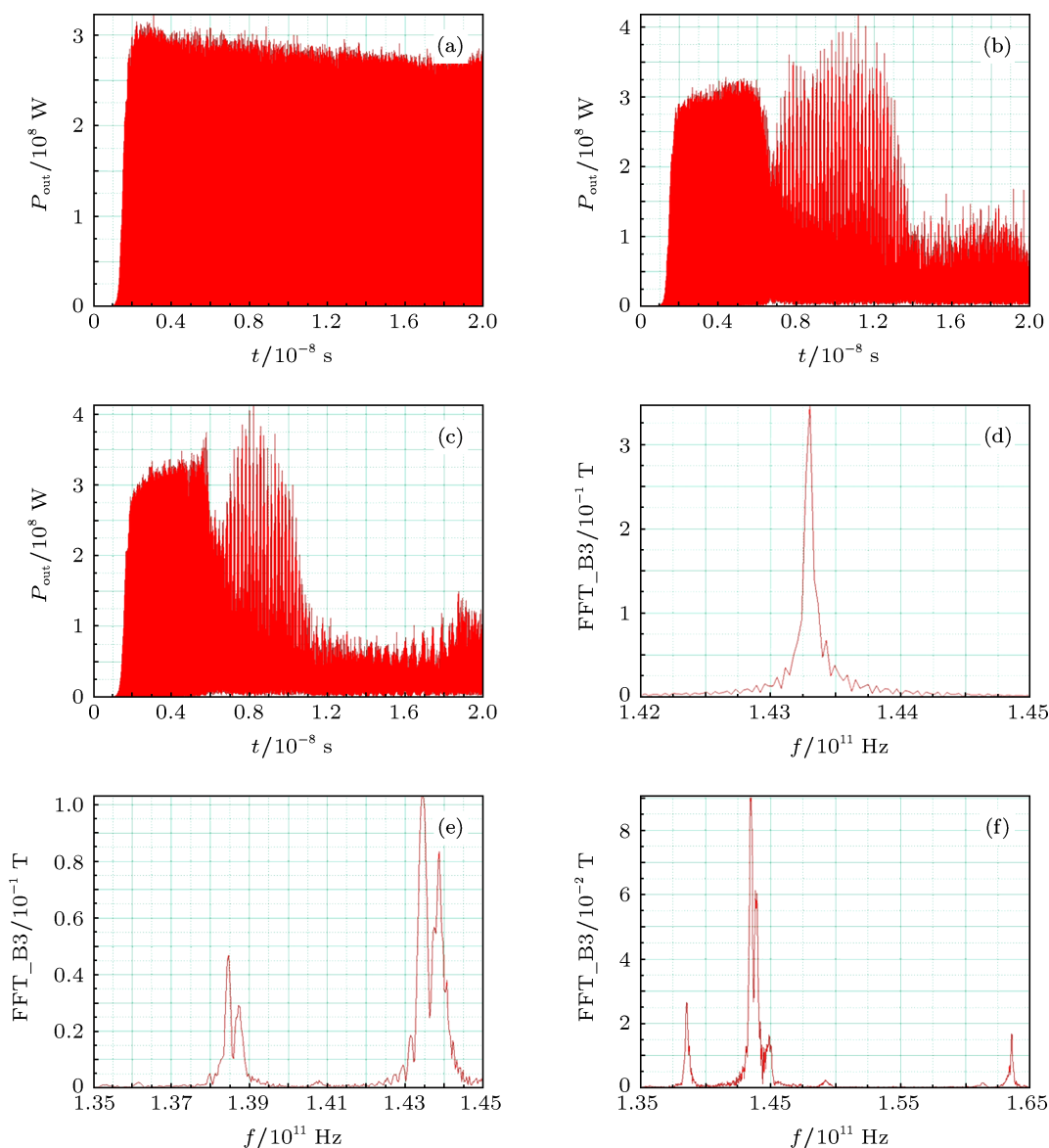


图4 模型在不同气压预填充状态下输出特性 (a) 100 Torr 输出功率; (b) 900 Torr 输出功率; (c) 1200 Torr 输出功率; (d) 100 Torr 频谱; (e) 900 Torr 频谱; (f) 1200 Torr 频谱

在模型注入 1200 Torr 气体时, 进一步增加模拟时间, 将脉冲宽度设置为 150 ns, 模拟结果如图 5(a)—(f) 所示. 从图 5(a) 可以看出, 在器件发生脉冲缩短现象以后, 由于等离子体的共振吸收, 器件的输出功率变小; 电子束与氩气碰撞不断产生等离子体, 在 70 ns 以后, 器件进入高功率输出阶段, 这段时间的输出功率超过真空情况下输出功率的两倍. 经过分段傅里叶变换得出各个时间段的输出频谱, 从图 5(b)—(d) 可看出 6 ns 前的输出频率为 0.1435 THz, 70—100 ns 时间段的输出频率为 0.1443 THz, 120—150 ns 时间段的输出频率为 0.1396 THz, 可见特定密度的背景等离子体可以大

幅提高太赫兹真空电子管的输出功率, 同时改变器件的工作点.

器件模拟得到的电子相空间分布如图 5(e) 和 (f) 所示. 从图中可以看出, 在输出功率的“截止”阶段, 电子束的振荡幅度与器件正常工作时基本一致, 但在 70 ns 时电子束的振荡幅度明显增强, 器件进入高功率输出阶段. 出现这种现象的原因是在共振吸收阶段, 等离子体密度不断增加, 低能电子的能量在共振吸收中不断增加, 直至能量与发射的相对论电子能量相比拟, 并开始参与器件的振荡输出, 导致电子的速度调制程度进一步加剧, 从而产生更高的功率输出. 器件在这个阶段的输出功

率水平提高了一倍多, 整体效率接近 50%, 输出频率则没有明显变化. 当模拟至 115 ns 时, 电流达到 3500 A, 如图 6(a) 所示; 器件的主要输出频率由原来的 0.143 THz 变为 0.139 THz, 如图 5(d) 所示. 当器件未填充惰性气体, 二极管电流强度为 3500 A

时, 模拟结果如图 6(b) 和 (c) 所示. 从图中可以看出, 当电流增加至 3500 A 时, 输出频率为 0.139 THz, 该模拟结果表明填充气体后频率发生变化是因为等离子碰撞产生电流导致器件工作点发生改变.

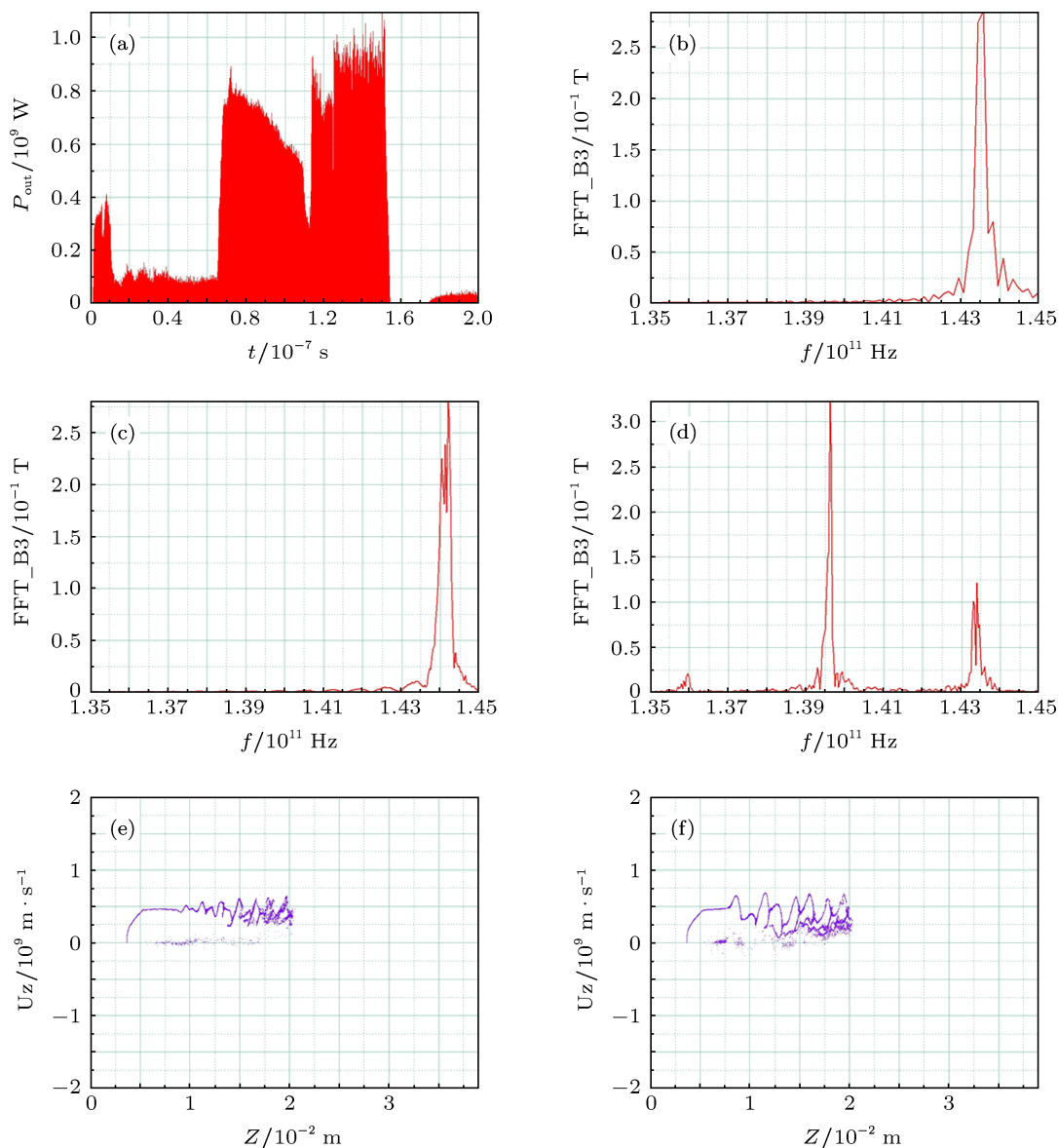


图 5 模型在 1200 Torr 气体预填充状态下输出特性 (a) 1200 Torr 输出功率; (b) 0—6 ns 频谱; (c) 70—100 ns 频谱; (d) 120—150 ns 频谱; (e) 60 ns 电子相空间分布; (f) 70 ns 电子相空间分布

## 5 结论

本文采用粒子模拟软件 UNIPIC 对等离子体填充的太赫兹相对论返波管模型进行了模拟计算. 结果表明, 等离子体背景下的太赫兹返波管出现了脉冲缩短、起振时间变短和器件输出功率提高等现象. 因此, 等离子体背景能够引起太赫兹波段真空

电子器件脉冲缩短等不良结果, 并且出现新的频率分量. 一定密度的等离子体能够在减少起振时间的同时提高器件的输出功率, 因此可以通过注入等离子体的方法来提高太赫兹真空电子管器件性能.

作者衷心感谢西安交通大学电信学院王建国教授的指导和帮助.

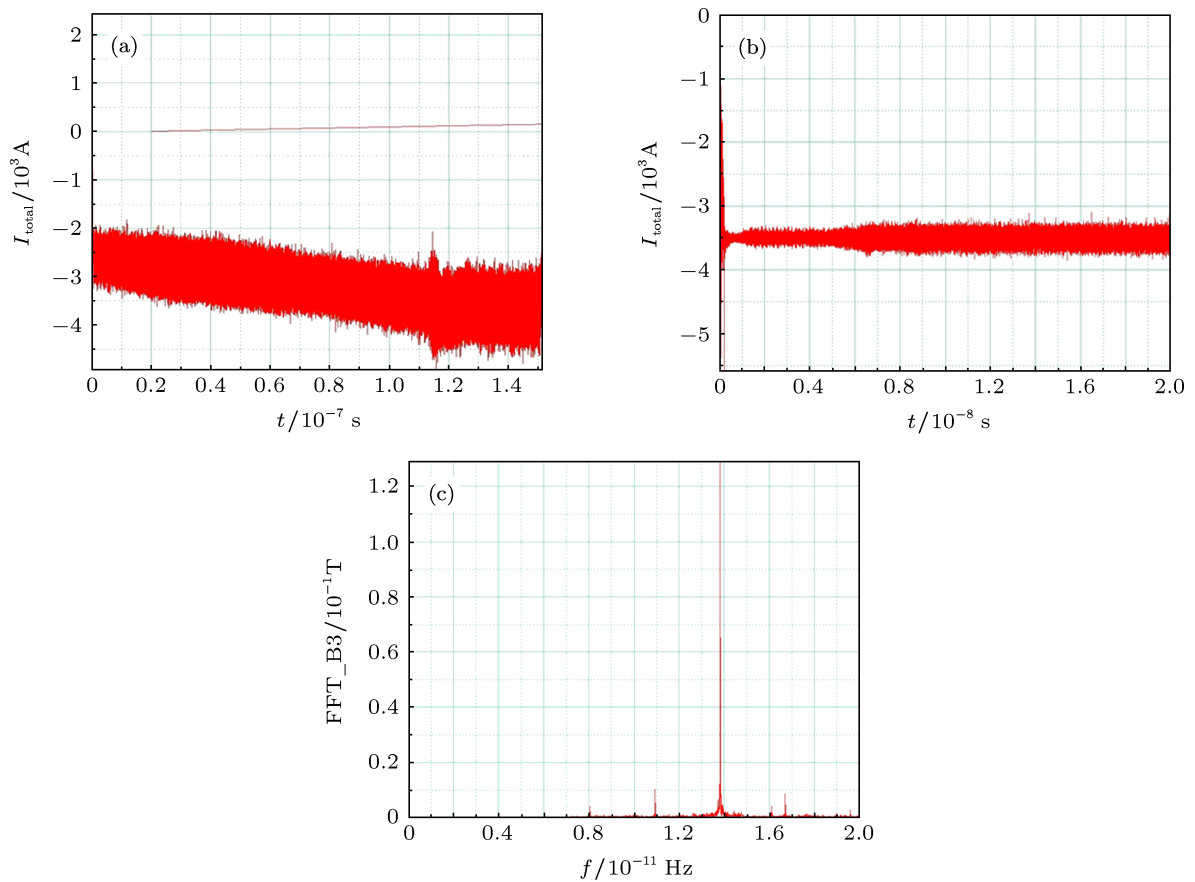


图6 填充气体与真空模型结果对比 (a) 气压为 1200 Torr 时电流随时间变化; (b) 模型电流为 3500 A 时的电流; (c) 模型电流为 3500 A 时的频谱

- [1] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **5** 055502
- [2] Zhang H, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang G Q 2009 *Phys. Plasmas* **16** 123104
- [3] Li X Z, Wang J G, Song Z M, Chen C H, Sun J, Zhang X W, Zhang Y C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 83111
- [4] Li X Z, Wang J G, Tong C J, Zhang H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4613 (in Chinese) [李小泽, 王建国, 童长江, 张海 2008 物理学报 **57** 4613]
- [5] Zhai X L, Eusebio T, Robert P, Gregory B, Amnon F 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **21** 141
- [6] Li X Z, Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Wang X F, Song Z M, Li S, Lu X C 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 451 (in Chinese) [李小泽, 王光强, 王建国, 童长江, 王雪峰, 宋志敏, 李爽, 陆希成 2013 强激光与粒子束 **25** 451]
- [7] Wang G Q, Wang J G, Li X Z, Fan R Y, Wang X Z, Wang X F, Tong C J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8459 (in Chinese) [王光强, 王建国, 李小泽, 范如玉, 王行舟, 王雪峰, 童长江 2010 物理学报 **59** 8459]
- [8] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang X F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030702 (in Chinese) [王光强, 王建国, 童长江, 李小泽, 王雪峰 2011 物理学报 **60** 030702]
- [9] Wang J G, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang Y, Wang H G, Qiao H L, Li X Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
- [10] Wang J G, Wang Y, Zhang D H 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681
- [11] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** 302
- [12] Wang J G, Chen Z G, Wang Y, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang H G, Qiao H L, Fu M Y, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107
- [13] Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency <http://www-amdis.iaea.org> [2005-8-10]
- [14] Bell L, Gillbody B, Hughes J G, Kingston, Simith F J 1983 *Phys. Chem. Ref. Data* **12** 891
- [15] Chen C H 1999 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [陈昌华 1999 博士学位论文 (西安: 西北核技术研究所)]
- [16] Xiao R Z 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [肖仁珍 2007 博士学位论文 (北京: 清华大学)]

# Simulation of 0.14 THz relativistic backward-wave oscillator filled with plasma

Wang Yu<sup>1)2)</sup> Chen Zai-Gao<sup>2)†</sup> Lei Yi-An<sup>1)</sup>

1) (*School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 20 December 2012; revised manuscript received 21 January 2013)

## Abstract

In this paper, a 0.14 THz relativistic backward-wave oscillator (RBWO) filled with neutral argon gas is simulated by using the UNIPIC code. The effects of plasma on the output power, frequency, and the start-oscillation time of the RBWO filled with different-pressure gases are studied. The simulation result shows that the background plasma can cause the pulse-shortening and new frequency appearing in the 0.14 THz RBWO. Appropriate plasma infusion can reduce the start-oscillation time and increase the output power of 0.14 THz RBWO.

**Keywords:** terahertz, relativistic backward-wave oscillator, particle simulation, plasma

**PACS:** 52.65.-y, 34.50.Gb, 07.57.Hm, 52.80.-s

**DOI:** 10.7498/aps.62.125204

---

† Corresponding author. E-mail: chbtmczg@163.com