

相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究

陈再高¹⁾²⁾ 王建国^{1)2)†} 王玥²⁾ 朱湘琴²⁾ 张殿辉²⁾ 乔海亮²⁾

1)(西安交通大学, 电子与信息工程学院, 西安 710049)

2)(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2013年9月23日收到; 2013年10月25日收到修改稿)

本文研究了相对论返波管产生X波段超辐射问题, 产生中心频率为9.25 GHz的电磁脉冲, 并在相对论返波管的输出端直接接入VLASOV辐射天线. 提出将粒子模拟软件UNIPIC与自行研制的天线辐射模块相结合, 实现超辐射现象微波的产生以及辐射的全过程模拟, 并研究了输出功率随注入波脉冲以及填充稀有气体气压的变化. 模拟结果表明, 器件的峰值功率可以达到3.68 GW, 瞬时效率超过100%, VLASOV天线在斜切角为20°时, 天线的增益达到15.5 dB, 在1 km处的功率密度可达到0.728 W/cm².

关键词: 超辐射, 相对论返波管, 粒子模拟, VLASOV

PACS: 84.40.Fe, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.63.038402

1 引言

高功率微波(HPM)因其在国防和工业方面具有重要应用而得到快速发展^[1]. 通常采用真空电子器件产生HPM, 在这种器件中, 带电粒子与电磁波发生非线性相互作用, 将带电粒子的动能转化为微波能量. 现在长脉冲窄带的高功率微波器件一般采用数十纳秒的注入波, 产生的高功率的幅值可以到达吉瓦, 工作频率为一个点频, 带宽非常窄, 需要通过调节器件的工作点用于改变器件的工作频率^[2-5]. 微波波段的超辐射现象是一种相干辐射, 能够在亚纳秒时间尺度产生频谱宽度较宽的辐射, 并且其峰值效率在理论上可以达到100%以上, 任何工作在切伦科夫辐射的器件均能够用于产生相干辐射^[6,7].

相对论返波管作为一种高功率微波器件, 输出功率可以到达吉瓦, 是一种非常具有前景的高功率微波器件, 从上世纪70年代开始至今, 前苏联、美、中等国家投入了大量的人力物力开展相对论返波管的理论、数值模拟和实验研究, 目前, 在X波段的窄带相对论返波管输出功率可达到5 GW,

主要关注的重点是提高输出功率和效率、小型化、锁频锁相等^[8]. 本文主要研究X波段高功率相对论返波管产生超辐射问题, 并且采用全电磁PIC粒子模拟软件UNIPIC对相对论返波管进行了模拟设计, 整个超辐射所产生的电磁脉冲持续时间为1 ns, 输出功率达到吉瓦量级, 采用VLASOV天线能够使得器件在很宽的频率范围内辐射功率, 同时使得整个装置比较紧凑. 提出将粒子模拟软件UNIPIC与自行研制的天线辐射模块相结合, 实现了超辐射现象微波的产生以及辐射的全过程模拟以及参数模拟研究.

2 粒子模拟方法简介

目前, 全电磁粒子模拟方法是高功率微波器件设计的主要数值方法, 2.5维全电磁粒子模拟软件UNIPIC^[9,10]能够模拟RBWO、虚阴极振荡器以及磁绝缘线振荡器等一系列高功率微波器件^[10-14], 并已应用于高功率太赫兹源的设计^[15-20].

全电磁PIC算法是HPM产生过程的“第一原理”或“全物理”的描述^[21]. 也就是说, 在很少近似的条件下, 它求解Maxwell电磁方程组和Newton-

† 通讯作者. E-mail: wanguiuc@mail.xjtu.edu.cn

Lorentz 力方程等基本方程组. 其算法流程如图 1 所示.

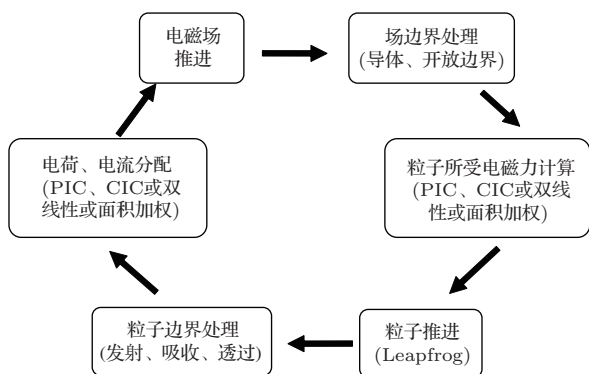


图 1 PIC 算法流程框图

电磁场的时变积分形式的 Maxwell 方程组为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \right) = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} - \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right) = - \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}. \quad (2)$$

对 (1) 和 (2) 式进行中心差分离散

$$\frac{\tilde{\mathbf{D}}^{n+1} - \tilde{\mathbf{D}}^n}{\Delta t} = \tilde{\mathbf{H}}^{n+1/2} - \mathbf{I}^{n+1/2}, \quad (3)$$

$$\frac{\tilde{\mathbf{B}}^{n+1/2} - \tilde{\mathbf{B}}^{n-1/2}}{\Delta t} = -\tilde{\mathbf{E}}^n. \quad (4)$$

带电粒子运动遵循 Newton-Lorentz 力方程

$$\frac{d}{dt} \gamma m \mathbf{v} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}. \quad (6)$$

对其进行中心差分离散得

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1/2} - \mathbf{u}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{q}{m} \left(\mathbf{E}^n + \frac{\mathbf{u}^{n+1/2} + \mathbf{u}^{n-1/2}}{2\gamma^n} \times \mathbf{B}^n \right), \quad (7)$$

$$\frac{\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\gamma^n} \mathbf{u}^{n+1/2}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{u} = \gamma \mathbf{v}$, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 是粒子所在位置处的电磁场.

通过联合求解电磁场方程和粒子运动方程, 可以得到粒子参数的时空分布、产生电磁波的电磁场时空分布、频谱特性和功率的时间变化等. 关于粒子模拟算法的详细内容参见文献 [22].

高功率微波产生后通过天线辐射, 本文将高功率微波产生和天线辐射的模拟联合计算. 通常是将高功率微波产生过程和辐射过程分开模拟, 这样必须将高功率微波产生源的振幅和相位记录下来, 再

作为馈源信息输入到天线模拟程序中. 这样做的问题是我们必须记录大量的数据信息, 而且瞬态计算的源相位信息很难获取, 尤其对超辐射的宽带源信息更是如此. 因此, 本文的方法可以克服上述困难, 并且能精确计算超辐射源的天线辐射特性.

3 X 波段相对论返波管的超辐射研究

3.1 UNIPIC 粒子模拟软件模拟超辐射产生

采用 UNIPIC 软件模拟相对论返波管的超辐射源的产生过程如图 2 至图 5 所示, 其中注入波电压的上升沿为 0.2 ns, 脉冲平顶为 3.0 ns, 下降沿为 0.1 ns, 器件由二十个周期的慢波结构构成, 慢波结构的每一个周期长度均为 0.016 m, 平均波纹半径为 0.015 m, 波纹深度为 0.002 m, RBWO 的驱动电压和电流分别为 500 kV 和 4.8 kA. 图 2(a) 是器件的阴阳极之间的电压, 从图中可以看出作用到二极管上的电压幅值为 721 kV, 图 2(b) 为器件的束电流, 从图中可以看出其稳定的电流为 5.05 kA. 图 3(a) 是 3.5 ns 时粒子的相空间图, 从图中可以看出粒子的群聚非常明显, 并且与非相干辐射情况相比 [15], 其群聚更加明显, 并且回流电子更少, 有利于延长阴极的寿命, 可以开展重复频率源的研究, 图 3(b) 是 3.5 ns 时粒子的实空间图. 图 4(a) 是器件在输出波导端口的功率图像, 从图中可以看出, 峰值功率在 1 GW 以上的图像共有 13 个振荡周期, 持续时间约为 0.72 ns, 在 7.39 ns 时, 输出的峰值功率可以达到 3.68 GW, 在该时刻的瞬时效率达到 100%, 图 4(b) 为器件的功率谱, 从图中可以看出功率超过 100 MW 的带宽为 3.36 GHz. 图 5(a) 为输出端口中产生磁场随时间变化的图像, 其频谱分布如图 5(b) 所示, 从中可以看出, 频谱的半带宽可以达到 1.68 GHz. 图 6 为器件在 6.96 ns 时, 横截面上电场的幅度分布图, 从图中可以看出, 器件工作在 TM_{01} 模. 图 7 为峰值功率随着慢波结构周期数的变化, 从图中可以看出, 当脉冲宽度一定时, 增加周期的数目, 当达到 25 个周期数时, 输出的功率值保持不变, 这与参加超辐射相互作用电子的电荷量的平方成正比相对应, 图 8 为当器件的周期数固定为 20 个, 输出峰值功率随着脉冲持续时间的变化, 从图中可以看出峰值功率随着持续时间的变化功率会呈现一个指数的增长, 但是当脉冲持续时间变的更长时非常快的转入到非相干辐射, 导致效率

下降. 器件的峰值功率随着注入波的上升沿和下降沿的变化如图 9 和图 10 所示, 从中可以看出, 当上升沿大于 0.2 ns 时器件的峰值功率迅速下降, 而器件的峰值功率随下降沿的影响相对较小. 因此, 相对论返波管的超辐射输出功率与注入波脉冲的上升沿以及脉冲平顶的持续时间有非常大的关系. 图 11 为器件填充稀有气体 Ar 后, 输出功率随着气

压的变化情况, 从图中可以看出在一个大气压下填充稀有气体有助于提高器件的输出功率, 对工作状态影响较小, 主要是因为电子通道中产生等离子体减少电子之间的互斥作用力, 同时由于产生的电磁脉冲持续时间非常短, 因此对电磁脉冲的形成过程的影响较小.

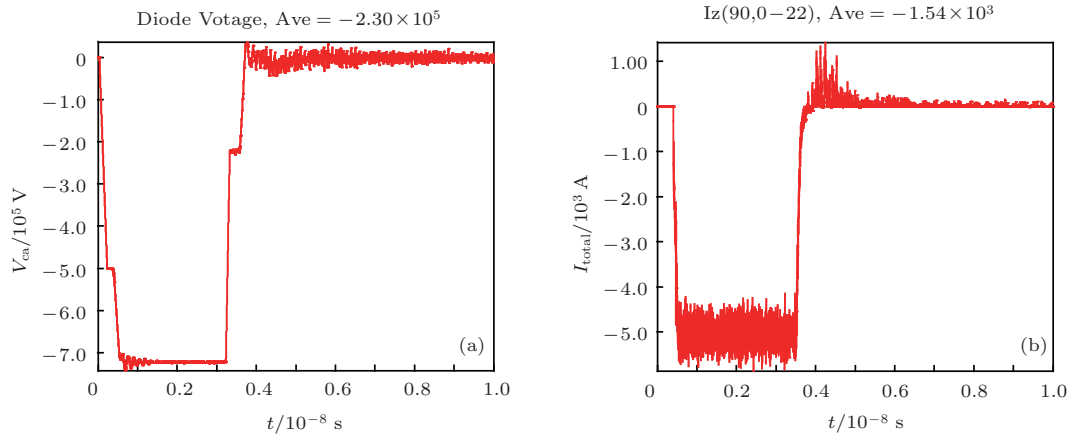


图 2 二极管上的电压和电流 (a) 电压; (b) 束电流

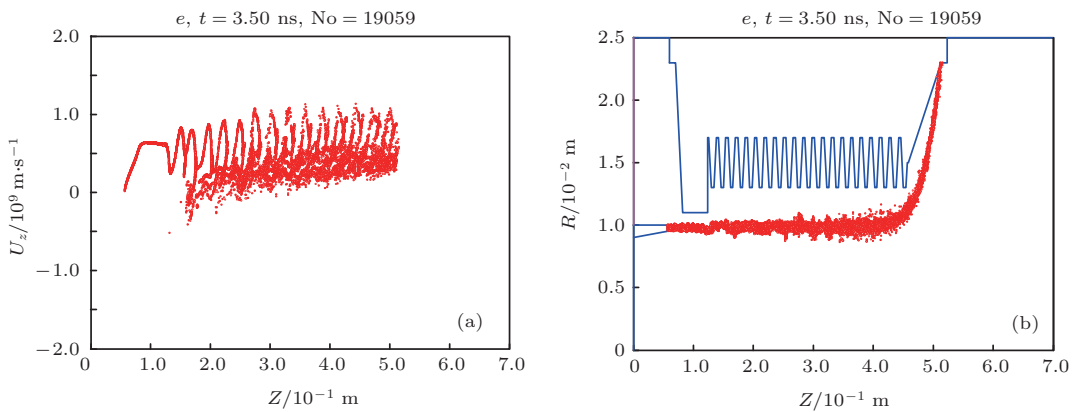


图 3 3.5 ns 时刻粒子的相空间和实空间图 (a) 相空间图; (b) 实空间图

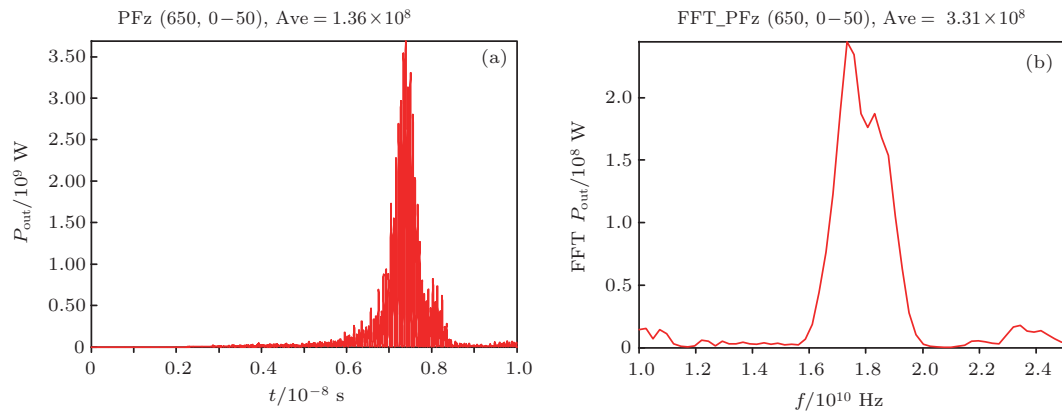


图 4 器件输出端口的功率及功率谱 (a) 输出功率; (b) 功率谱

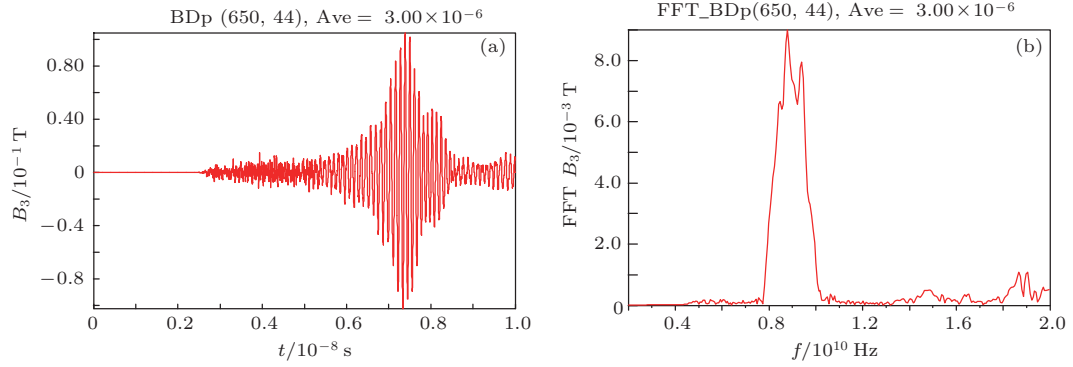


图5 产生信号的磁场及其频谱 (a) 磁场随时间变化; (b) 磁场频谱

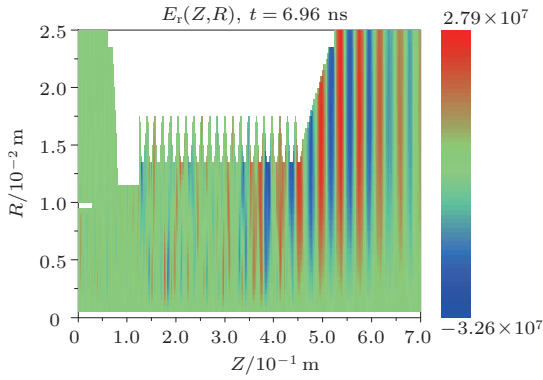


图6 电场 E_r 的分布图像

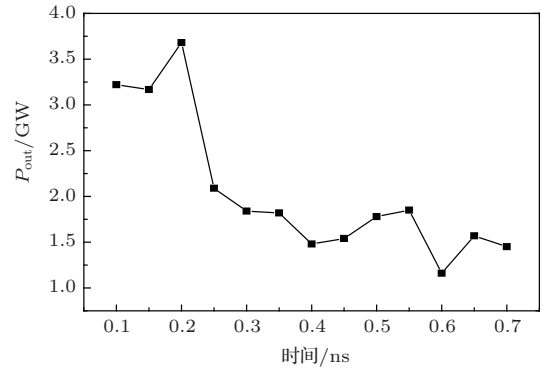


图9 峰值功率随上升沿的变化

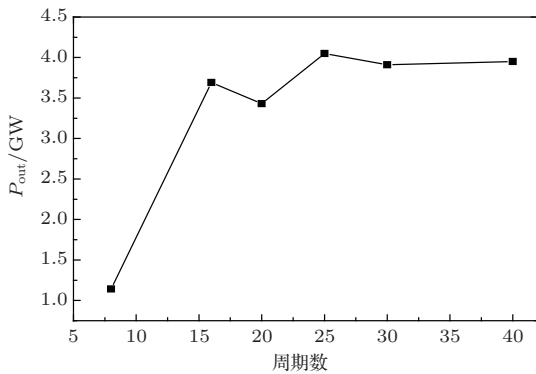


图7 输出峰值功率随周期结构数的变化

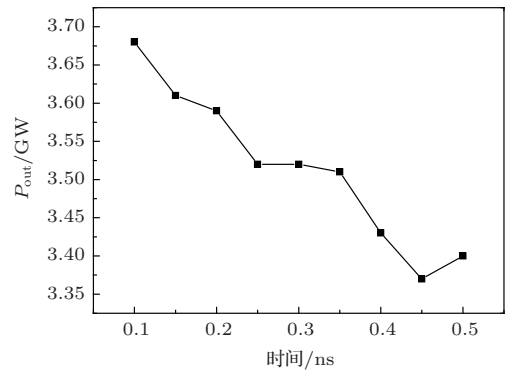


图10 峰值功率随下降沿的变化

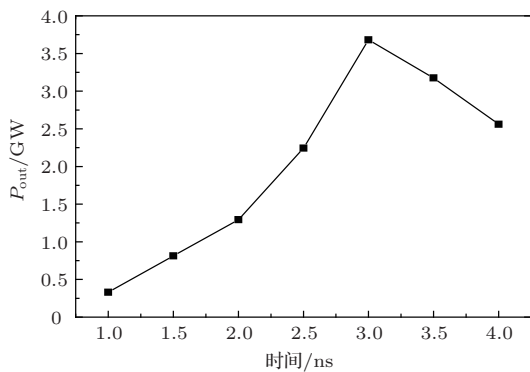


图8 峰值功率随脉冲持续时间的变化

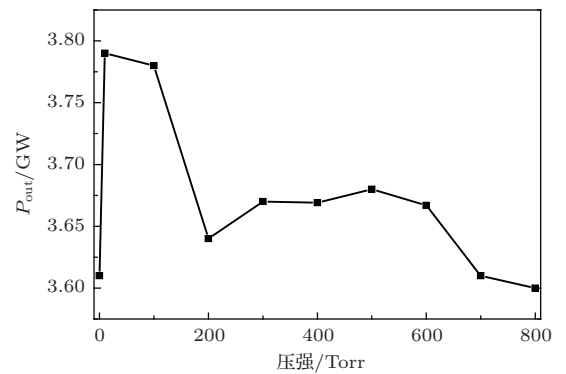


图11 输出功率随气体压强的关系 (1 Torr = 1.33×10^2 Pa)

3.2 模拟超辐射脉冲的VLASOV天线辐射

高功率微波对电子器件具有毁伤效应, 当使用 $0.01\text{--}1\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 功率密度的微波束照射目标时, 能干扰带内工作的雷达、通信设备和导航系统, 使其无法正常工作. 当微波功率密度达到 $0.01\text{--}1\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 可导致雷达、通信和导航设备的微波器件性能下降或者失效, 小型计算机芯片失效或者被烧毁. 采用相对论返波管产生的超辐射电磁波具有频带宽的特点, 比窄带的高功率微波器件能更容易耦合到电子系统内部^[23], 干扰的可能性更大. 相对论返波管产生的超辐射的电磁波经过波导的传输后, 采用VLASOV天线进行辐射, 超辐射所产生的波为一个亚ns级的脉冲, 并且频带比较宽, 采用比较长的传输波导进行传输, 会带来波的色散等特性, 采用超辐射的末端直接接入VLASOV天线的辐射方式能够使得器件的辐射更加有效, 同时结构也更为紧凑, 由于峰值功率较高, 采用方向性比较强的其他形式的天线, 会导致电场在天线的表面产生放电击穿^[24-26].

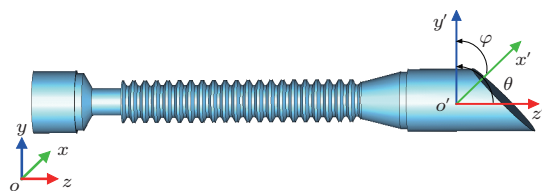


图12 装置的三维模型图

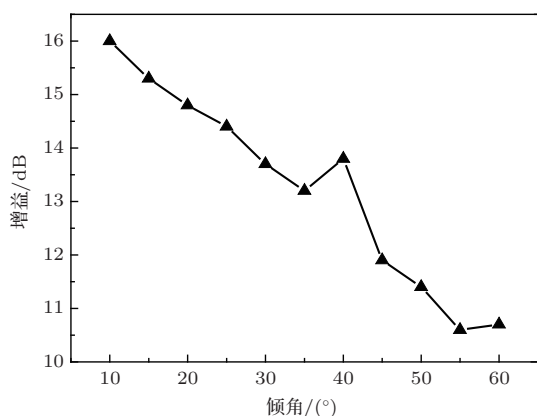


图13 天线斜切的倾角与增益的关系

采用西北核技术研究所自行研制的三维并行天线模块与2.5维粒子模拟软件UNIPIC相结合模拟超短脉冲产生以及辐射的全过程^[27,28], 天线与

器件的整个装置结构示意图如图12所示. 粒子模拟软件在端口输出 TM_{01} 模式高功率电磁脉冲, 将该脉冲作为馈源注入到天线模块, 在 $z = 0.7\ \text{m}$ 的电磁场数据作为两个程序模块的接口面用于全电磁粒子模拟软件和天线模块的衔接, 如图3(b)所示.

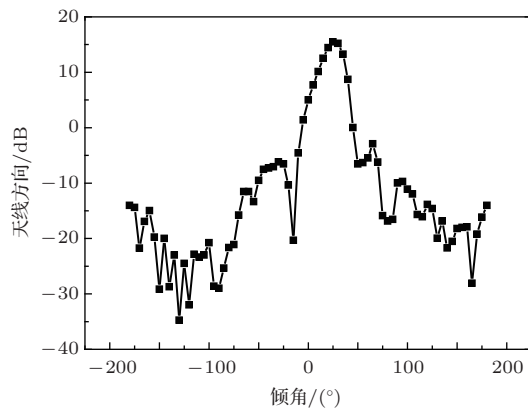


图14 斜切的倾角为 20° 时天线的方向图

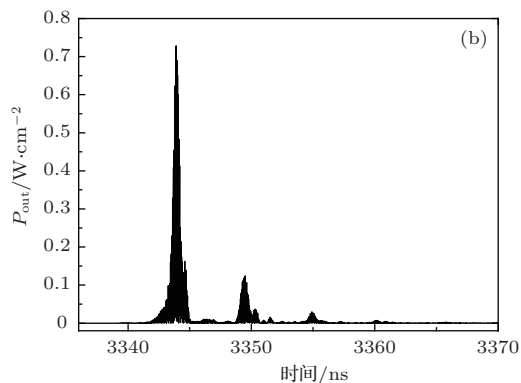
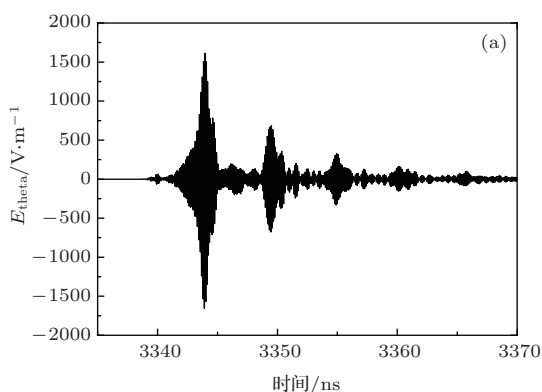


图15 远场1 km处电场及功率密度随时间的变化 (a) 电场随时间变化; (b) 功率密度随时间变化

采用天线模块模拟得到的VLASOV天线斜切倾角与天线增益的关系如图13所示, 图中表示的为 $9.25\ \text{GHz}$ 时VLASOV天线在不同斜切倾角情

况下的增益,从图中可以看出当斜切的倾角越小时,它的方向性系数越大.当斜切倾角小于 25° 时,天线的增益大于14 dB.选择整个装置沿着 z 方向放置,VLASOV天线的斜切角为 20° ,并且斜切面所在平面与水平面的交线为一条与 x 轴平行的直线,如图13所示,计算得到的 $\varphi = 90^\circ$ 时的方向图如图14所示,从图中可以看出,方向性系数在仰角 θ 为 25° 时达到15.5 dB,第一副瓣所在位置的仰角 θ 为 65° ,方向性系数为 -2.9 dB,在仰角为 25° 时,模拟结果表明电场主要沿 θ 方向,通过调节斜切面的方位角能改变电场的极化方向.1 km处的水平电场随时间变化的图像如图15(a)所示,从图中可以看出在 $3.344 \mu\text{s}$ 时电场的幅值达到最大为 1.657 kV/m ,图15(b)为瞬时功率沉积随时间变化的图像,从图中可以看出功率密度最大为 0.728 W/cm^2 ,因此采用重频工作能够提高能量的沉积.

4 结 论

本文采用粒子模拟软件UNIPIC与天线模块相结合的方式对超辐射短脉冲的产生以及辐射进行了全过程的模拟.模拟结果表明,提出的X波段相对论返波管结构能用于产生超辐射的电磁波,其峰值功率可以达到3.68 GW,效率可达到100%,并且从功率谱上可以看出功率在100 MW以上的带宽为3.36 GHz,器件的输出功率随着注入电压脉冲的上升沿以及平顶时间的影响比较大,器件中填充稀有气体对器件的输出功率的影响较小.直接采用VLASOV天线辐射脉冲,在1 km处电场的幅值最高可以达到 1.65 kV/m ;最高微波功率密度达到 0.728 W/cm^2 ;下一步将采用粒子模拟与其他电磁优化方法相结合进一步优化辐射源^[14,28-31],并采用该数值平台对整套系统进行全局的优化设计.

参考文献

[1] Barker R J and Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (IEEE Press, New York) pp7-32, pp376-437
 [2] Shao H, Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387 (in Chinese)[邵浩, 刘国治 2001 物理学报 **50** 2387]
 [3] Lu Z G, Gong Y B, Wei Y Y, Wang W X 2006 *Chin. Phys.* **15** 2661
 [4] Song W, Lin Y Z, Liu G Z, Shao H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 939
 [5] Li W, Liu Y G, Yang J H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 038401 (in Chinese)[李伟, 刘永贵, 杨建华 2012 物理学报 **61** 038401]

[6] Ginzburg N S, Novozhilova N Y, Zotova I V, Sergeev A S, Peskov N Y, Phelps A D, Wiggins S M, Cross A W, Ronald K, He W, Shpak V G, Yalandin M I, Shunailov S A, Ulmaskulov M R, Tarakanov V P 1999 *Phys. Rev. E* **60** 3297
 [7] Zhang H, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang G Q 2009 *Phys. Plasmas* **16** 123104
 [8] Song W, Zhang X, Chen C, Sun J, Song Z 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 494
 [9] Wang J, Zhang D, Liu C, Li Y, Wang Y, Wang H, Qiao H, Li X 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
 [10] Wang J, Wang Y, and Zhang D 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681
 [11] 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]
 [12] Liu G Z, Yang Z F, Sun J, et al. 2009 *IEEE Transactions on Plasma Science* **37** 2048
 [13] Xiao R, Song W, Song Z, Sun J, Shao H, Chen C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 043109
 [14] Chen Z G, Wang J G, Wang Y, Qiao H L, Guo W J, Zhang D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 168402 (in Chinese)[陈再高, 王建国, 王玥, 乔海亮, 郭伟杰, 张殿辉 2013 物理学报 **62** 168402]
 [15] Li X Z, Wang J G, Song Z M, Chen C H, Sun J, Zhang X W, Zhang Y C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 083111
 [16] Wang G, Wang J, Tong C, Li X, Wang X, Li S, Lu X 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105
 [17] Li S, Wang J, Tong C, Wang G, Lu X, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120703 (in Chinese)[李爽, 王建国, 童长江, 王光强, 陆希成, 王雪峰 2013 物理学报 **62** 120703]
 [18] Wang G, Wang J, Li S, Wang X, Tong C, Lu X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150701 (in Chinese)[王光强, 王建国, 李爽, 王雪峰, 童长江, 陆希成 2013 物理学报 **62** 150701]
 [19] Wang Y, Chen Z G, Lei Y A 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 125204 (in Chinese)[王宇, 陈再高, 雷奕安 2013 物理学报 **62** 125204]
 [20] Li X, Wang J, Sun J, Song Z, Ye H, Zhang Y, Zhang L, Zhang L 2013 *IEEE Transactions on Electron Devices* **60** 2931
 [21] Birdsall C K, Langdon A B 1981 *Plasma Physics via Computer Simulation* (New York: McGraw-Hill)
 [22] Wang J G 2013 *Modern Applied Physics* **4** 251 (in Chinese)[王建国 2013 现代应用物理 **4** 251]
 [23] Wang J G, Liu G Z, Zhou J S 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1093 (in Chinese) [王建国, 刘国治, 周金山 2003 强激光与粒子束 **15** 1093]
 [24] Wang J, Cai L, Zhu X, Wang Y, Xuan C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 063503
 [25] Liu X H, He W, Yang F, Wang H Y, Liao R J, Xiao H G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075201
 [26] Cai L, Wang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3268 (in Chinese)[蔡利兵, 王建国 2009 物理学报 **58** 3268]
 [27] Wang J, Tian C, Liu X, Ge D 2001 *High Power Laser and Particle Beams* **13** 732 (in Chinese)[王建国, 田春明, 刘小龙, 葛德彪 2001 强激光与粒子束 **13** 732]
 [28] Johnson J M, Rahmat-Samii Y 1997 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **39** 7

- [29] Weile D S, Michielssen E 1997 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **45** 343
- [30] Rahmat-Samii Y, Michielssen E 1999 *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms* (New York: Wiley)
- [31] Wang J, Chen Z, Wang Y, Zhang D, Liu C, Li Y, Wang H, Qiao H, Fu M, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107

Numerical simulation of generation and radiation of super-radiation from relativistic backward wave oscillators

Chen Zai-Gao¹⁾²⁾ Wang Jian-Guo^{1)2)†} Wang Yue²⁾ Zhu Xiang-Qin²⁾
Zhang Dian-Hui²⁾ Qiao Hai-Liang²⁾

1) (School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

(Received 23 September 2013; revised manuscript received 25 October 2013)

Abstract

This paper studies the issues about the X-band super-radiance from a relativistic backward wave oscillator (RBWO) with the central frequency of 9.25 GHz, and the output port of the RBWO is directly connected to a vlasov antenna. The particle simulation code UNIPIC and the self-developed antenna simulation code are combined to simulate the full process of the generation and the radiation of the microwave pulse. Effects of natural gas at difference pressures and injected voltage pulse on the working characteristics of RBWO are simulated and discussed. Simulated results indicate that the peak value of the output power can achieve 3.68 GW, and the instantaneous efficiency can exceed 100%. When the tilted angle of vlasov antenna is 20 degrees, the gain of the antenna is 15.5 dB. The power density can reach 0.728 W/cm² at the far distance of 1 km.

Keywords: super-radiance, relativistic backward wave oscillators, particle simulation, vlasov

PACS: 84.40.Fe, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.63.038402

† Corresponding author. E-mail: wanguic@mail.xjtu.edu.cn