

基于粒子模拟和并行遗传算法的高功率微波源优化设计

陈再高¹⁾²⁾ 王建国^{1)2)†} 王玥²⁾ 乔海亮²⁾ 郭伟杰¹⁾ 张殿辉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3月30日收到; 2013年4月28日收到修改稿)

提出了基于粒子模拟和并行遗传算法的高功率微波源优化设计方法, 以全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 模拟的高功率微波器件输出功率作为适应度函数, 采用浮点数编码的遗传算法对高功率微波源器件进行优化. 采用该算法, 对相对论返波管的布拉格反射器位置以及高度进行了浮点数编码, 然后在巨型机上进行参数的全局优化, 获得了该返波管布拉格反射器的全局最优参数.

关键词: 并行遗传算法, 相对论返波管, 粒子模拟, 高功率微波源

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

DOI: 10.7498/aps.62.168402

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^[1-3]. 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. 在设计真空电子器件时, 首先采用小信号理论得到真空电子器件的大致参数范围, 然后通过数值模拟方法, 调节器件参数, 获得较好的输出功率以及频谱分布. 真空电子器件设计需要调节的参数非常多, 通常做法是先调节某个参数, 获得关于该参数的最优的结果; 固定这一参数, 调节另外参数, 再一次获得最优结果, 最终完成真空电子器件的设计. 在真空电子器件的设计过程中, 结构以及电参数之间往往存在相互制约的关系, 所以尽管可能获得某一个参数的最优解, 但所获得的结果可能不是全局的最优解. 这种设计方法实质上是选优过程, 而不是实际意义上的优化设计. 为了获取全局的最优解, 需要在全局空间进行参数的优化. 比较常用的全局优化方法有遗传算法、模拟退火法、

蚁群法、神经网络方法等. 本文提出了基于全电磁 PIC 算法的并行遗传算法, 该方法相比参数扫描法能够更加快速、准确地优化真空电子器件结构, 使得器件的输出功率最大, 最后采用该方法对相对论返波管 (RBWO) 中布拉格反射器的参数进行全局优化.

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 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^[4-8], 并已应用于高功率太赫兹源的设计^[9-12].

全电磁 PIC 算法是 HPM 产生过程的“第一原理”或“全物理”的描述^[13]. 也就是说, 在很少近似的条件下, 它求解 Maxwell 电磁方程组和 Newton-Lorentz 力方程等基本方程组. 其算法流程如图 1 所示.

电磁场的时变积分形式的 Maxwell 方程组为

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

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

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

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 $u = \gamma v$, \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.

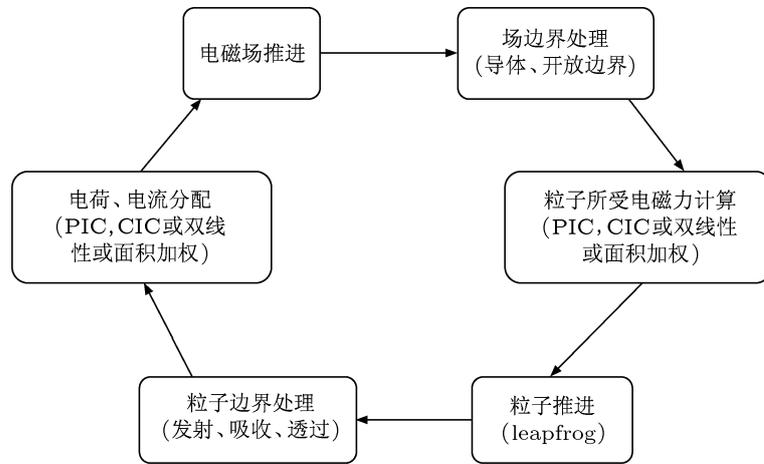


图 1 PIC 算法流程框图

3 并行遗传算法

3.1 遗传算法简介

遗传算法是根据达尔文自然进化论和 Mendel 遗传变异理论为基础的求解复杂全局优化问题的仿生学算法 [14-16], 其基于适者生存、优胜劣汰的进化原则, 对包含可能解的群体反复使用遗传学的基本操作, 不断地生成新的群体, 使种群不断进化, 同时在全局并行搜索优化群体中的最优化个体, 以求得满足要求的最优解或准最优解.

遗传算法首先需要对每一个个体进行基因编码,

$$\text{chromosome} = [p_1 p_2 \cdots p_i \cdots p_n], \quad (9)$$

其中, 每一个 p_i 为染色体的遗传因子. 通过下式计算每一个个体的适应度:

$$\text{Fitness} = f(p_1, p_2, \cdots, p_i, \cdots, p_n). \quad (10)$$

遗传算法主要有三个算子, 选择算子是根据个体的适应度, 按照一定的规则或方法, 从第 n 代中

选择一些优良的个体遗传到下一代, 选择概率 P_i 由下式计算获得:

$$P_i = f_i / \sum_{j=1}^n f_j, \quad (11)$$

其中 f_i 为每一个个体的适应度.

交叉算子是将种群中的各个个体随机搭配, 对每一个个体, 以某一概率交换它们的部分染色体,

$$\begin{matrix} \left(\begin{matrix} p_1^i p_2^i p_3^i \cdots p_{c-1}^i p_c^i p_{c+1}^i \cdots p_n^i \\ p_1^j p_2^j p_3^j \cdots p_{c-1}^j p_c^j p_{c+1}^j \cdots p_n^j \end{matrix} \right) \\ \xrightarrow{\text{交叉}} \left(\begin{matrix} p_1^i p_2^j p_3^i \cdots p_{c-1}^i p_c^j p_{c+1}^i \cdots p_n^j \\ p_1^j p_2^i p_3^j \cdots p_{c-1}^j p_c^i p_{c+1}^j \cdots p_n^i \end{matrix} \right). \end{matrix} \quad (12)$$

变异算子是对种群中的每个个体, 以某一概率改变某一个或某些基因座上的基因值为其他的等位基因:

$$\begin{matrix} (p_1 p_2 p_3 \cdots p_{m-1} p_m^{\text{old}} p_{m+1} \cdots p_n) \\ \xrightarrow{\text{变异}} (p_1 p_2 p_3 \cdots p_{m-1} p_m^{\text{new}} p_{m+1} \cdots p_n). \end{matrix} \quad (13)$$

在对大规模问题用遗传算法进行优化时, 计算量主要集中在计算个体适应度, 其数值大小和它能够在下一代存活概率相关联。

3.2 并行遗传算法

在本文所提出的并行遗传算法中, 将 UNIPIC 软件模拟得到的器件输出功率作为每一个个体的适应度. 计算适应度需要模拟结构参量改变后的高功率微波源器件, 直到器件有稳定的功率输出, 导致计算适应度的时间较长; 采用并行遗传算法能够节省优化所需时间. 本文提出的并行遗传算法是将每一个个体的适应度 (器件的输出功率) 由单独的进程进行并行计算^[17], 其流程如图 2 所示. 第一步时主进程通过读取参数, 并通过参数随机产生一组模型参数, 将每一组参数发送给相应的进程; 在所有进程执行第二步时, 每一个进程通过接收的参数生成新的模型文件, 调用 UNIPIC 软件计算内核读入模型文件进行模拟, 并对稳定后的输出功率求平均值而得到个体的适应度值, 发送给主进程; 主进程单独执行第三、四、五步, 在获取每一个个体的适应度值后, 首先是将适应度最大的个体挑选出, 并对剩下的个体进行选择操作, 如果某一个体输出功率较大, 它被选择存活到下一代的概率就大; 以一定概率进行交叉以及变异操作产生新的

模型参数; 主进程将模型参数再次发送到每一个进程. 每一个进程修改器件模型文件并进行 PIC 模拟执行第六步适应度的计算, 如果不满足最优则跳往第三步执行. 最后由主进程执行第七和第八步, 完成目标优化。

4 返波管布拉格结构自动优化

相对论返波管是一种比较常见的高功率微波源器件^[1], 其中的布拉格反射器能够在高压二极管和波-注相互作用区之间形成匹配, 并且可以抑制相互作用区形成的返波对高压二极管的影响, 对增强器件的稳定性、提高输出功率有非常大的影响。

采用 UNIPIC 软件模拟带有布拉格反射器的返波管模拟结果如图 3 所示. 带有布拉格反射器的截止颈总长度为 4.2 cm, 其中布拉格反射器在 z 方向的起始点为 0.097 m, 高度为 0.023 m, RBWO 的驱动电压和电流分别为 500 kV 和 4.8 kA, 电子束发射面沿着 R 方向的位置区间为 [0.0095, 0.01] m. 图 3(a) 是相对论返波管的模型图, 图 3(b) 是 20 ns 时粒子的相空间图, 图 3(c) 是磁场的频谱分布图, 图 3(d) 是返波管输出功率图。

采用本文建立的优化方法对带有布拉格反射器的返波管进行自动优化. 首先对布拉格反射器的起始位置以及高度进行浮点数编码, 布拉格结构起始点沿着 z 轴方向坐标的取值范围为 [0.084, 0.116] m 沿着 r 方向高度的取值范围为 [0.018, 0.025] m, 模型的其他参数和驱动电参数保持不变. 现将种群数目设置为 80, 进化 50 代后, 得出优化的布拉格结构在 z 方向的起始坐标为 0.108 m, 高度为 0.023 m. 采用 UNIPIC 软件模拟优化后的返波管模型, 结果如图 4 所示. 图 4(a) 为 20 ns 时粒子实空间图, 图 4(b) 为粒子 20 ns 时相空间图, 图 4(c) 为磁场的频谱分布, 图 4(d) 为微波管的输出功率. 优化前采用图 3(a) 所示参数模拟, 结果表明在 12 ns 以后输出的平均功率为 280 MW, 如图 5(a) 所示; 而进行参数优化后, 在 12 ns 以后输出的平均功率为 760 MW, 如图 5(b) 所示. 当把布拉格结构的高度定为 0.023 m 时, 输出功率随其所在位置的变化如图 6(a) 所示; 对应最佳起始位置, 改变布拉格反射器的高度, 其输出功率的变化如图 6(b) 所示. 从图中可以看出, 采用本文算法优化的布拉格反射器能获得最大的输出功率。

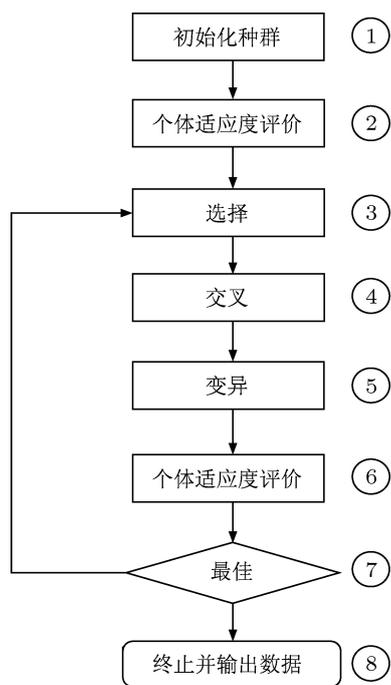


图 2 并行遗传算法流程图

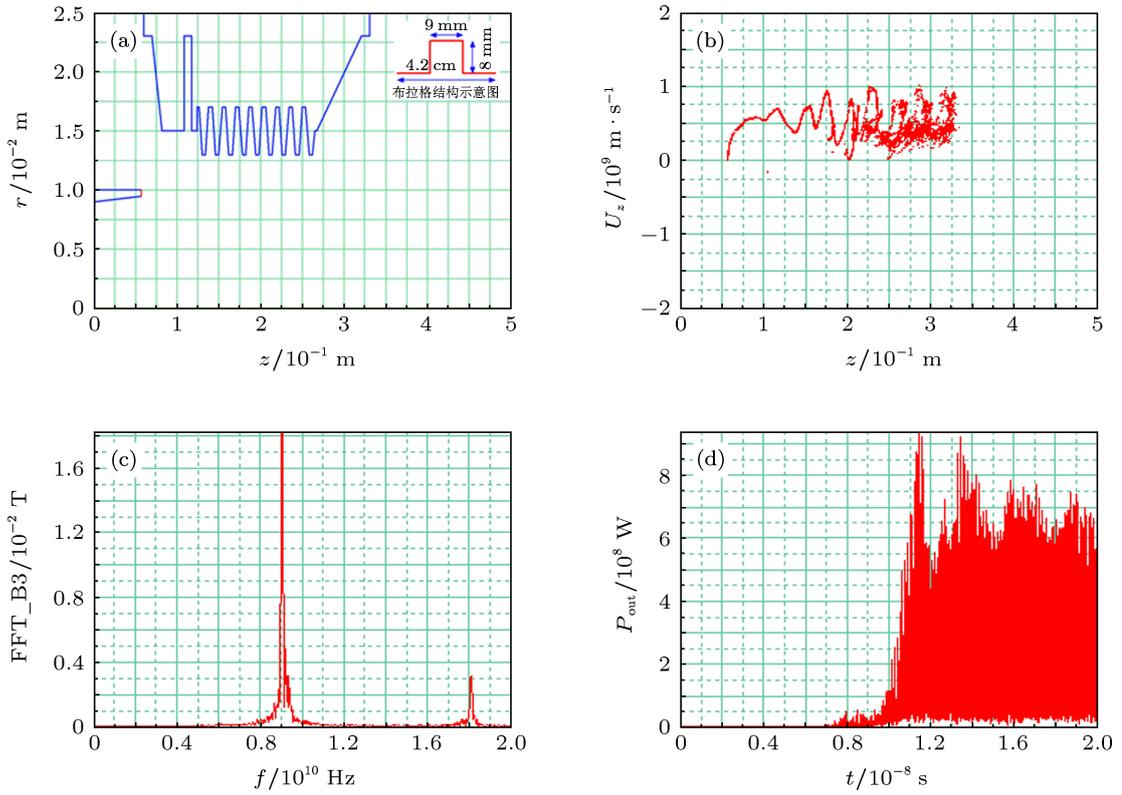


图3 UNIPIC 模拟参数优化前返波管 (a) 相对论返波管模型; (b) 粒子相空间分布; (c) 微波输出频谱; (d) 返波管模拟输出功率

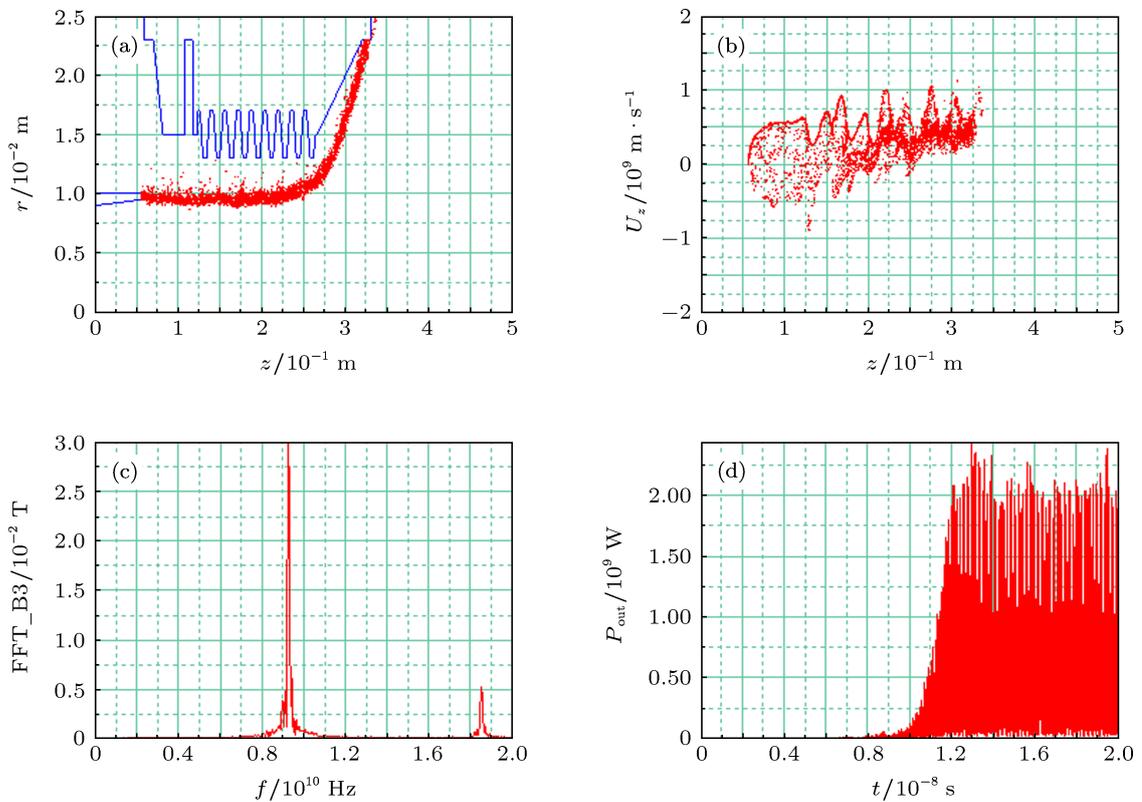


图4 UNIPIC 模拟参数优化后返波管 (a) 粒子实空间分布; (b) 粒子相空间分布; (c) 微波输出频谱; (d) 返波管模拟输出功率

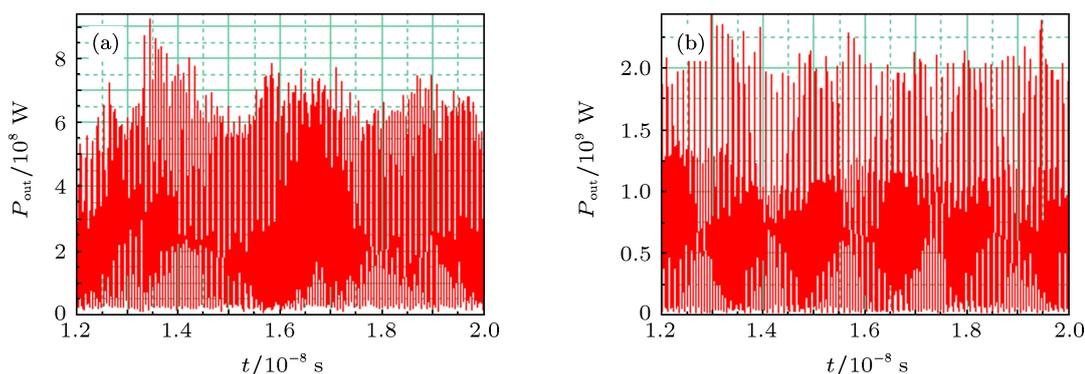


图5 返波管输出平均功率图 (a) 未优化参数返波管输出功率; (b) 优化参数返波管输出功率

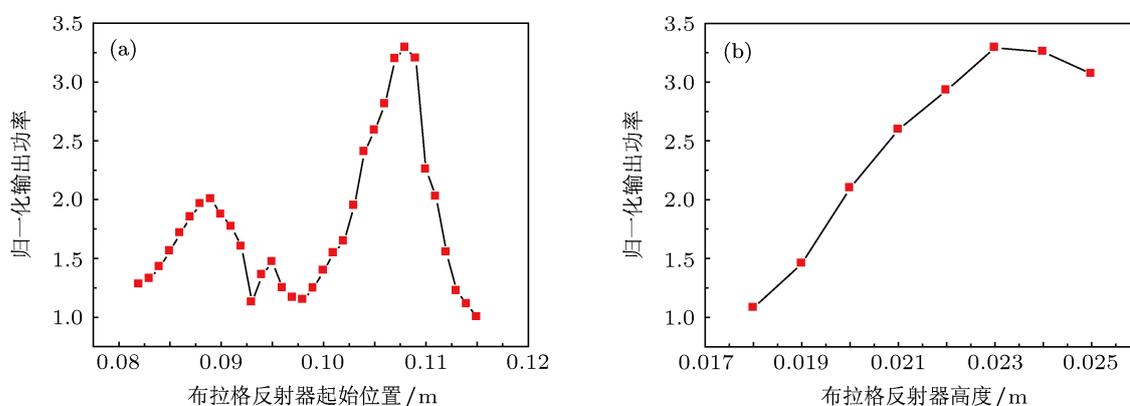


图6 布拉格结构单一参数最优时输出功率 (a) 不同位置布拉格结构输出功率; (b) 不同高度布拉格结构输出功率

5 结论

本文提出了基于粒子模拟和并行遗传算法的高功率微波源优化设计方法. 在该方法中, 以全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 模拟得到的高功率微波器件输出功率作为适应度函数, 采用浮点数编码的遗传算法对高功率微波源器件进行优化. 针对相对论返波管中布拉格反射器位置以及高度, 进行了全局

优化, 获得了该返波管布拉格反射器的全局最优参数. 优化后的器件结构的输出功率约为优化前结果的三倍. 结果表明, 采用该算法能够使得器件参数全局最优的情况下输出的功率达到最大. 下一步将同时考虑模型参数以及电参量的全局优化, 并将该方法推广到三维全电磁粒子模拟软件 UNIPIC-3D 中[18].

[1] Barker R J, Schamioglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (New York: IEEE Press) pp7-32, 376-437

[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] 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]

[4] Wang J, Zhang D, Liu C, Li Y, Wang Y, Wang H, Qiao H, Li X 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108

[5] Wang J, Wang Y, Zhang D 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681

[6] 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]

[7] Song W, Zhang X, Chen C, Sun J, Song Z 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 494

[8] Xiao R, Song W, Song Z, Sun J, Shao H, Chen C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 043109

[9] Wang G Q, Wang J G, Li S, Wang X F, Tong C J, Lu X C 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]

[10] 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

[11] Wang G, Wang J, Tong C, Li X, Wang X, Li S, Lu X 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105

[12] Li S, Wang J G, Tong C J, Wang G Q, Lu X C, Wang X F 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]
- [13] Birdsall C K, Langdon A B 1981 *Plasma Physics via Computer Simulation* (New York: McGraw-Hill)
- [14] Johnson J M, Rahmat-Samii Y 1997 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **39** 7
- [15] Weile D S, Michielssen E 1997 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **45** 343
- [16] Rahmat-Samii Y, Michielssen E 1999 *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms* (New York: Wiley)
- [17] Baker L Smith B J 1996 *Parallel Programming* (New York: McGraw-Hill)
- [18] Wang J, Chen Z, Wang Y, Zhang D, Liu C Li Y, Wang H, Qiao H, Fu M, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 07317

Optimal design of high-power microwave source based on particle simulation and genetic algorithms

Chen Zai-Gao¹⁾²⁾ Wang Jian-Guo^{1)2)†} Wang Yue²⁾ Qiao Hai-Liang²⁾
Guo Wei-Jie¹⁾ Zhang Dian-Hui²⁾

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 30 March 2013; revised manuscript received 28 April 2013)

Abstract

Optimal design method of high-power microwave source based on particle simulation and parallel genetic algorithm is presented in this paper. The output power of the high-power microwave device, simulated by the fully electromagnetic particle simulation code UNIPIC, is given as a fitness function, and the float-encoding genetic algorithm is used to optimize the high-power microwave device. Using this method, we encode the position and height of the Bragg reflector of the relativistic backward wave oscillator (RBWO), and optimize the parameters for a massively parallel processor. Simulation results demonstrate that we can obtain the global optimal parameters of the Bragg reflector of the RBWO.

Keywords: parallel genetic algorithms, relativistic backward wave oscillators, particle simulation, high-power microwave sources

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

DOI: 10.7498/aps.62.168402

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