

文章编号: 2095-4980(2013)05-0664-06

## 能散度与发射度模块在太赫兹 FWTWT 模拟中的应用

董 焯<sup>1,2</sup>, 董志伟<sup>1,2</sup>, 杨温渊<sup>1,2</sup>, 张 芳<sup>1,2</sup>, 周海京<sup>1,2</sup>

(1.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2.中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 研制了三维全电磁粒子模拟大规模并程序 NEPTUNE3D 的能散度和发射度模块, 主要用于评估电子出射速度和方向分布对太赫兹折叠波导行波管(FWTWT)性能的影响。将能散度和发射度模块应用到 0.22 THz 的 FWTWT 器件粒子模拟中, 结果表明: 能散度主要通过改变器件束压范围, 使其偏离束波互作用共振电压范围, 导致器件性能下降; 发射度反映电子发射角的发散, 同时影响纵向与横向电子速度, 电子横向速度的增加导致其更易碰撞通道内壁, 使电子总数下降, 导致器件性能下降; 若束压保持不变, 电子横向速度的增加势必导致轴向速度的减小, 破坏束波同步条件, 导致器件性能进一步下降。

**关键词:** 三维全电磁粒子模拟; 能散度与发射度模块; 太赫兹折叠波导行波管; 大规模并行计算  
**中图分类号:** TN385      **文献标识码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA201305.0664

## Applications of electron kinetic and angular spread modules for Terahertz Folded-Waveguide Traveling Wave Tube simulation

DONG Ye<sup>1,2</sup>, DONG Zhi-wei<sup>1,2</sup>, YANG Wen-yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Fang<sup>1,2</sup>, ZHOU Hai-jing<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

2.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** For analyzing the influence of emitted electrons velocity and direction distribution on the performance of terahertz Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWTWT), the kinetic and angular spread modules of a massively parallel 3-D fully electromagnetic and Particle In Cell(PIC) code named NEPTUNE3D are designed. The above modules are applied to the simulation of 0.22 THz FWTWT successfully. The simulated results could be concluded as followings. The kinetic spread alters the range of electron-beam voltage distribution which destroys the oscillation voltage relation between electron beam and electromagnetic wave, therefore causes the degrading of device performance. The angular spread reflects the distribution of emission angle which alters electron transverse and axial velocities. As the increasing of transverse velocity, many electrons will collide with the inner-wall of tube which causes the degrading of device performance. At the same time, considering the constant beam voltage, the decreasing of electron axial velocity could destroy the synchronous condition between beam and wave, which causes the device performance degrading furthermore.

**Key words:** 3-D fully electromagnetic and Particle In Cell Simulation; kinetic and angular spread modules; Terahertz Folded Waveguide Traveling Wave Tube; massively parallel computation

在我国高功率微波源研究发展需求牵引下, 作者所在研究团队开发了具有自主知识产权的、三维全电磁粒子模拟大规模并程序 NEPTUNE3D<sup>[1]</sup>。Terahertz(THz)科学技术的广泛应用前景, 使其成为一个重要发展方向。THz 源方面, 传统电真空与微机电加工技术相结合, 产生了折叠波导行波管(FWTWT)<sup>[2-5]</sup>等一批具有潜力的新型 THz 源器件。为拓展该程序在模拟微电真空 THz 源方面的模拟能力和应用范围, 前期丰富了几何建模功能, 引入 PML(Perfectly Matched Layer)模块抑制自激振荡, 研制了 THz 频段下材料电导率及表面加工粗糙度引发电磁损

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2013-06-18

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心资助项目(T2012-050309; T2013-06-0309); 国家自然科学基金资助项目(11305015); 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2009B0402046; 2012B0402064); 国家高技术发展计划资助项目

耗的有限电导率模块<sup>[6-7]</sup>。THz 微电真空器件由于频率高,尺寸小,因此对束流准直度、流通率和束流品质都提出了更为严格的要求,束流能散度和发射度是影响上述参数的重要因素,其直接影响器件电子枪以及聚焦磁场的设计。为研究 FWTWT 器件发射电子速度和方向分布(发散)对器件性能的影响,研制了能散度和发射度模块,并将其成功应用到 0.22 THz 的 FWTWT 器件粒子模拟中,给出了量化评估结果,为相关实验研究提供参考。

### 1 能散度与发射度定义及相应模块的实现

首先介绍能散度模块。二极管电压不稳或其他外界因素均会带来出射电子动能发散,可以用能散度的概念加以描述。若粒子出射能量平均值为  $U_0$ ,能散度为  $kinetic\_spread$ ,那么粒子的出射能量范围为<sup>[8]</sup>:

$$\left[ \left( 1 - \frac{kinetic\_spread}{2} \right) U_0, \left( 1 + \frac{kinetic\_spread}{2} \right) U_0 \right]$$

粒子在出射能量范围内可以均匀分布,也可以其他分布形式出射。程序实现时需要引入蒙特卡罗随机抽样过程,即每时间步间隔时刻每个粒子的出射能量在出射能量范围内随机分布,但每时间步间隔时刻所有粒子的分布满足给定的概率分布关系。

一般,使用的是均匀分布情况,给定随机数  $R \in [0,1]$ ,则

$$U = U_0 + \frac{(kinetic\_spread)(2R-1)}{2} U_0$$

以粒子平均出射能量 17.3 keV,能散度为 5%为例,进行随机蒙特卡罗抽样,图 1 为 1 000 个抽样粒子的随机抽样能量分布图。可以看出,所有抽样粒子出射能量均在  $[16.8675 \text{ keV}, 17.7325 \text{ keV}]$  的出射能量范围内,接近均匀分布。定制了出射能量区间范围以数据表形式给出各区间段粒子的分布概率,以满足不同分布形式下抽样粒子出射能量。 $E_{min}$  为最小发射能量,  $E_{max}$  为最大发射能量, DFE 为能量分布函数,其由 7 个点构成,将  $[E_{min}, E_{max}]$  分为 6 个子区间,每个节点上给出概率分布值。若分布函数过于复杂,可以通过文件指定。

其次,介绍发射度模块。电子从阴极表面出射时,具有一定角度,如图 2 所示。其中,  $\theta$  为极化角,即电子出射方向与发射面法向的夹角;  $\varphi$  为水平方向的方位角。一般情况下,电子垂直发射面出射(即  $\theta = 0$ )。但某些情况下,电子并不是垂直发射面发射的或者从发射面引入电子时需要考虑发射角度的影响时,就需要利用粒子发射度模块。发射角度直接影响电子各个方向的初始速度分量,以图 2 为例:

$$\begin{cases} v_x = v \sin \theta \cos \varphi \\ v_y = v \sin \theta \sin \varphi \\ v_z = v \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v$  为速率;  $\theta$  和  $\varphi$  的最大取值范围:  $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ ,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。

一般情况下,  $\theta \in [0, \theta_0]$ ,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ,二者在其区间范围内均匀分布,分别给定 2 个随机数  $R_\theta \in [0,1]$ ,  $R_\varphi \in [0,1]$ ,则抽样粒子的随机出射速度为:

$$\begin{cases} v_x = v \sin(\theta_0 R_\theta) \cos(2\pi R_\varphi) \\ v_y = v \sin(\theta_0 R_\theta) \sin(2\pi R_\varphi) \\ v_z = v \cos(\theta_0 R_\theta) \end{cases} \quad (2)$$

同样定制了出射角度区间范围以数据表形式给出各区间段粒子的分布概率,以满足不同分布形式下抽样粒子出射角度。 $TH_{min}$  为最小极化角,  $TH_{max}$  为最大极化角, DFTH 为极化角分布函数;  $FI_{min}$  为最小方位角,  $FI_{max}$  为最大方位角; DFFI 为方位角分布函数。若分布函数过于复杂,可以通过文件指定能量分布函数。

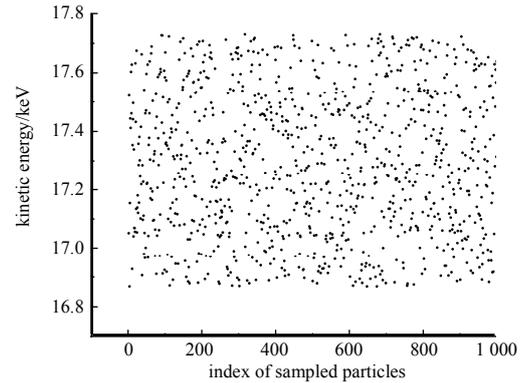


Fig.1 Sampled results of electron emission energy  
图 1 抽样粒子的随机出射能量分布

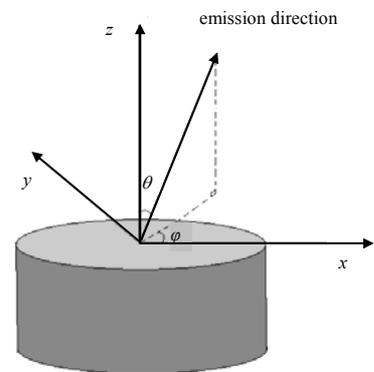


Fig.2 Schematic of electron emission angles  
图 2 粒子发射角度示意图

以极化角分布进行分布函数功能验证，取： $TH_{min}=0^\circ$ ， $TH_{max}=10^\circ$ ，DFTH 取 3 个点，分为 4 组模型：model 1(1,1,1)，model 2(1,2,1),model 3(1,3,1),model 4(1,4,1)。结果如图 3 所示。图 3 给出了 4 组模型的极化角  $\theta$  取值，可看出：model 1 的极化角在整个区间为均匀分布，随着中间数值的增加(model2→model3→model4)，中间区域( $5^\circ$ )附近的抽样数目逐渐增多，模块测试正确。

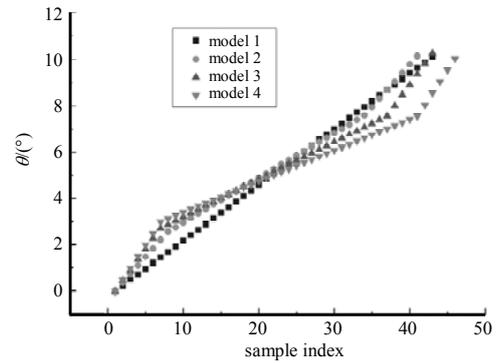


Fig.3 Sampled results of polarization angle  
图 3 不同模型极化角抽样结果对比

## 2 能散度与发射度模块在太赫兹折叠波导行波管模拟中的应用

利用添加能散度和发射度模块的 NEPTUNE3D 程序，模拟研究电子发射度和能散度对 0.22 THz 微电真空器件 FWGTWT 的影响，其几何结构如图 4 所示。FWGTWT 由一个弯曲折叠的矩波导和一个位于轴心位置用于电子束传输的圆柱波导联合构成。电磁波沿着弯曲的矩波导传输相当于其在轴向上的速度减慢，以便与轴向传输的电子束同步，发生束束互作用，吸收电子动能以获得增益和放大。优化后的几何结构参数： $a=0.852\text{ mm}$ ， $b=0.12\text{ mm}$ ， $P=0.28\text{ mm}$ ， $L_0=0.27\text{ mm}$ ， $D=0.15\text{ mm}$ ，50 个周期结构。电参数：束流 50 mA，信号功率 3.3 mW，频率 0.22 THz，外加轴向 0.4 T 稳恒磁场。网格规模： $64 \times 42 \times 1426$ ，粒子规模 300 万左右，在高性能 cluster 上采用多个处理器核并行计算。器件的几何结构建模结果如图 5 所示。

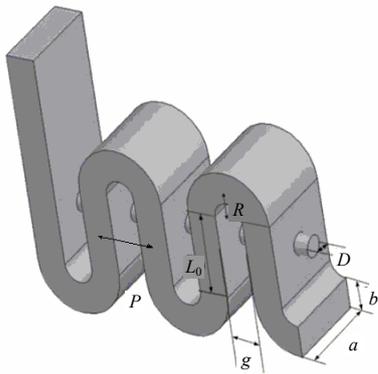


Fig.4 Schematic of FWGTWT  
图 4 折叠波导行波管几何结构示意图

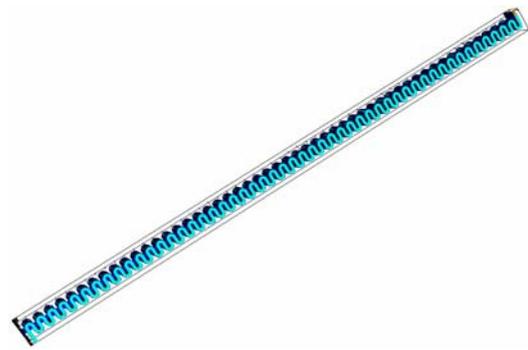


Fig.5 Geometric modeling result of FWGTWT by NEPTUNE3D  
图 5 折叠波导行波管几何结构 NEPTUNE3D 建模结果

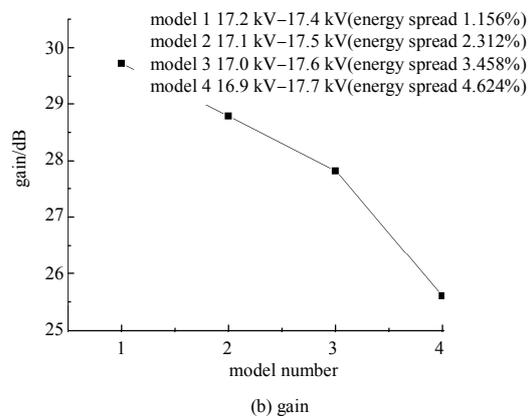
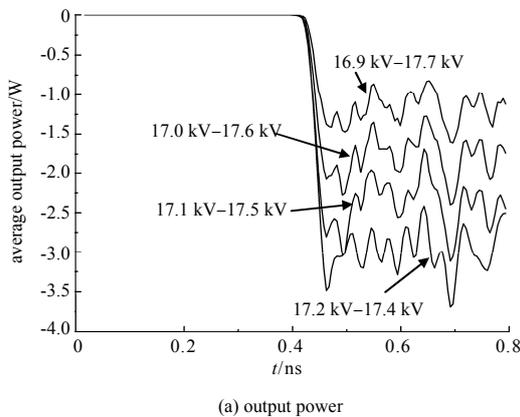


Fig.6 Influence of electron kinetic spread on output power and gain(polarization angle of  $0^\circ$ )  
图 6 能散度对输出功率和增益的影响(极化角  $0^\circ$ )

使用能散度模块，细致研究电子能散度对器件性能的影响过程。取中心平均电子束压 17.3 keV，计算 4 组能散度分布，分别为：17.2 keV~17.4 keV(对应能散度约为 1.156%)，17.1 keV~17.5 keV(对应能散度约为 2.312%)，17.0 keV~17.6 keV(对应能散度约为 3.458%)，16.9 keV~17.7 keV(对应能散度约为 4.624%)，各组能散度都服从均

匀分布。模拟结果如图 6~8 所示。从图 6 可以看出:随着出射电子能散度的增加,器件输出功率和增益明显下降。能散度在 1%左右时,器件增益为 29.8 dB;能散度在 4.6%附近时,器件增益仅为 25.5 dB 左右,下降幅度超过 3 dB(原来输出功率水平的一半)。可见,出射电子能散度对器件性能的影响较大。图 7 给出了不同能散度下的电子束归一化动量实空间分布图,可以看出:随着电子能散度的增加,束波相互作用区末端(收集极前端)电子束的群聚状态开始变坏,群聚状态出现杂乱分布。通过不同能散度下的电子束相空间  $P_z$ - $z$  分布图(图 8),也可以看出:随着出射电子能散度的增加,相互作用区域入口出射电子在  $z$  方向的动量  $P_z$  范围明显变宽( $P_z$  平均值不变),在相互作用区域末端电子束动量  $P_z$  调制状态混乱无规律,且动量  $P_z$  减小的电子束数量明显变少。能散度参数主要反映了器件束压的变化范围,其数值若超出束波相互作用共振电压范围,则势必导致器件性能的下降。

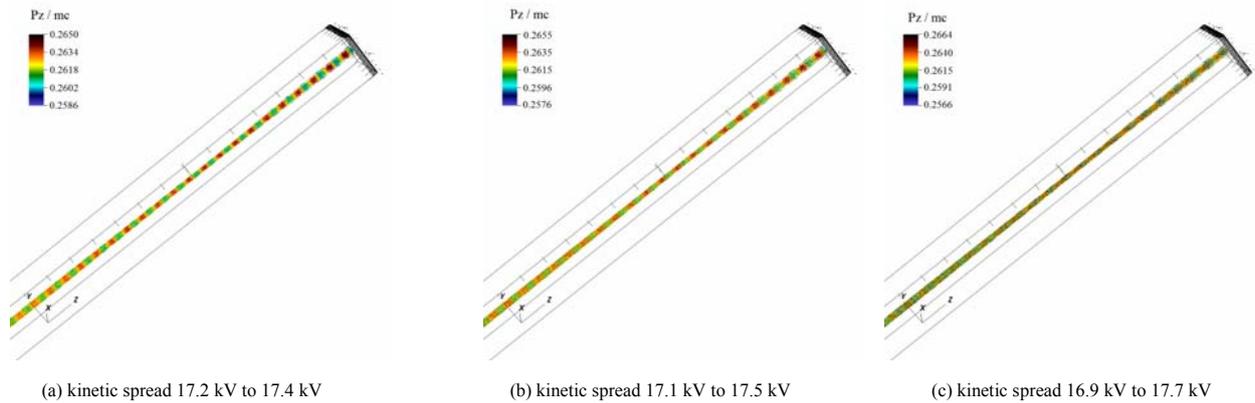


Fig.7 Electron space distribution with different kinetic spreads  
图 7 不同能散度下的电子束归一化动量实空间分布

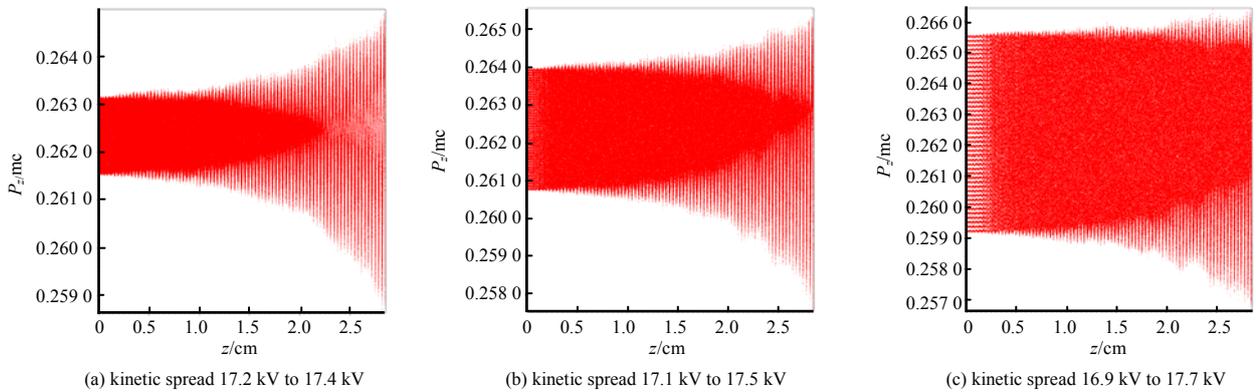


Fig.8 Electron  $P_z$ - $z$  distribution with different kinetic spreads  
图 8 不同能散度下的电子束相空间  $P_z$ - $z$  分布

使用发射度模块,细致研究电子发射度对器件性能的影响过程。随机选取极化发射角不同的 6 组模型,分别为:  $0^\circ\sim 1^\circ, 0^\circ\sim 2^\circ, 0^\circ\sim 3^\circ, 0^\circ\sim 4^\circ, 0^\circ\sim 5^\circ, 0^\circ\sim 6^\circ$ ;方位角在  $0^\circ\sim 360^\circ$  内随机取。发射角与方位角均服从均匀分布。模拟结果如图 9~图 11 所示。从图 9 可以看出:随着出射电子发射度的增加,器件输出功率和增益急剧下降。极化角为  $0^\circ\sim 1^\circ$  时,器件增益为 29 dB;极化角为  $0^\circ\sim 6^\circ$  时,器件增益已降至 14 dB。可见,相对能散度而言,电子发射度对器件性能的影响更大。图 10 给出了不同发射度下发射端附近电子束归一化动量实空间分布图,可以看出:随着电子发射度的增加,电子束在横向上呈现明显的发散现象。通过图 11 不同发射度下的电子束相空间  $P_z$ - $z$  分布图也可以看出:随着电子发射度的增加,相互作用区域入口出射电子在  $z$  方向的动量  $P_z$  范围明显变宽( $P_z$  平均值变小),在相互作用区域末端电子束动量  $P_z$  调制幅度变小,且动量  $P_z$  减小的电子束数量明显变少。发射度参数主要反映了电子发射角度的发散,其数值一方面影响轴向电子速度,一方面影响横向电子速度。电子横向速度的增加使其更易碰撞通道内壁,导致电子总数下降,使器件性能下降;同时,由于束压不变,电子横向速度的增加势必导致轴向速度的减小,破坏束波同步条件,进一步导致器件性能下降。因此,相对能散度而言,电子发射度对器件性能的影响更大,为保证器件的增益水平,必须严格控制电子发射度,否则将导致器件设计的失败。

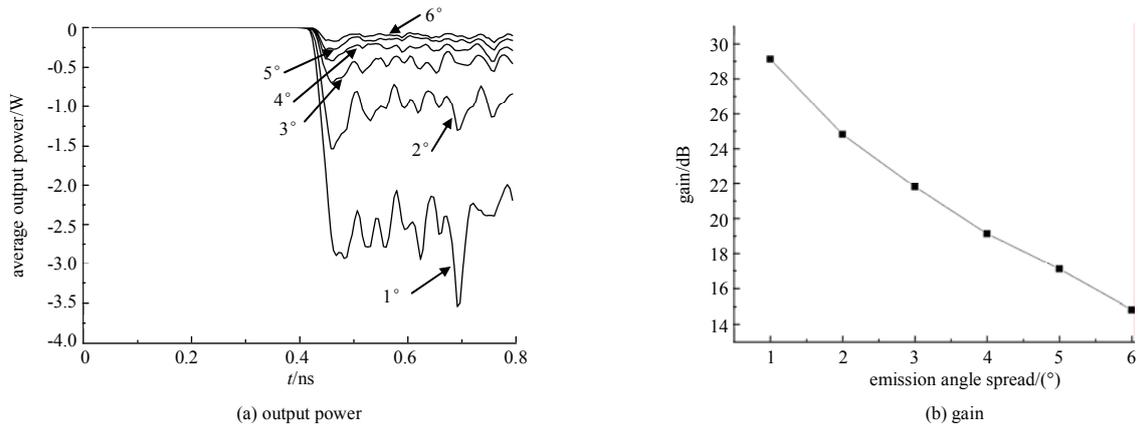


Fig.9 Influence of electron angular spread on output power and gain (beam voltage of 17.3 kV)  
图 9 发射角对输出功率和增益的影响 (束压 17.3 kV)

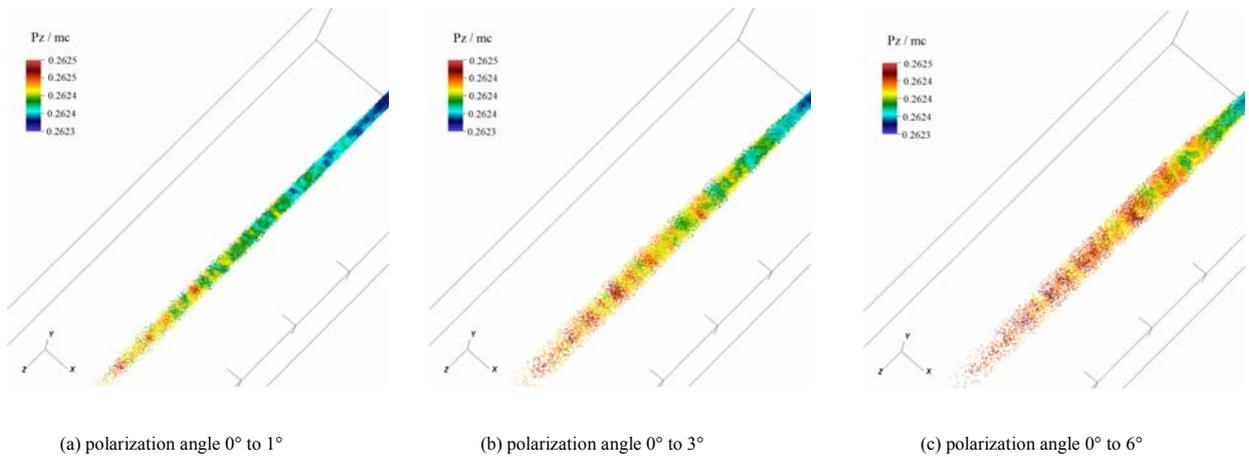


Fig.10 Electron space distribution with different angular spreads  
图 10 不同发射角下的电子束实空间分布

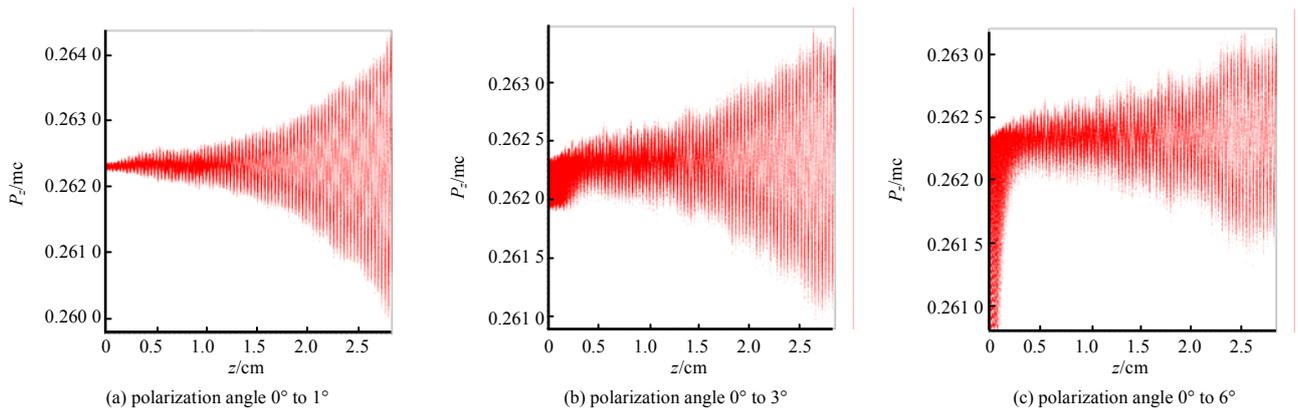


Fig.11 Electron  $P_z$ - $z$  distribution with different angular spreads  
图 11 不同发射角下的电子束相空间  $P_z$ - $z$  分布

### 3 结论

本文介绍了最新研制的能散度和发射度模块，并将其成功应用到 0.22 THz 的 FWTWT 器件粒子模拟中，模拟结果表明：能散度主要通过改变器件束压范围，使其偏离束波相互作用共振电压范围，导致器件性能下降。发射度反映电子发射角的发散，影响纵向与横向电子速度；电子横向速度的增加导致其更易碰撞通道内壁，使得电子总数下降，导致器件性能下降；若束压保持不变，电子横向速度的增加势必导致轴向速度的减小，其会破坏束波

同步条件,进一步导致器件性能的下降。束流发射度和能散度模块的研制,可为电子枪结构、聚焦磁场优化设计提供相关依据和帮助手段,也可为相关实验研究提供评估和参考。

#### 参考文献:

- [1] 董焯,陈军,杨温渊,等. 三维全电磁粒子模拟大规模并行程序 NEPTUNE3D[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(6):1607-1615. (DONG Ye, CHEN Jun, YANG Wenyan, et al. Massively paralleled code named NEPTUNE3D for 3D fully electromagnetic and PIC simulations[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(6):1607-1615.)
- [2] Bhattacharjee S, Booske J H, Kory C L, et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2004,32(3):1002-1014.
- [3] Ha H J, Jung S S, Park G S. Theoretical Study for Folded Waveguide Traveling Wave Tube[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998,19(9):1229-1245.
- [4] ZHENG Ruilin, CHEN Xuyuan. Parametric Simulation and Optimization of Cold-test Properties for a 220 GHz Broadband Folded Waveguide Traveling-wave Tube[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2009,30(9):945-958.
- [5] Gensheimer P D, Walker C K, Ziolkowski R W, et al. Full-scale three-dimensional electromagnetic simulations of a terahertz Folded-Waveguide Traveling-Wave Tube using ICEPIC[J]. IEEE Trans. on Terahertz Sci. and Tech., 2012,2(2):222-230.
- [6] 董焯,董志伟,杨温渊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管放大器理论分析与数值模拟[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):313-319. (DONG Ye, DONG Zhiwei, YANG Wenyuan, et al. Theoretical analysis and numerical study of 0.22 THz FWG-TWT[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):313-319.)
- [7] 董焯,董志伟,杨温渊,等. 用于太赫兹源粒子模拟的有限电导率模块研制[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1419-1426. (DONG Ye, DONG Zhiwei, YANG Wenyuan, et al. Development of Finite-Conductivity-Wall module in 3D fully electromagnetic and PIC code named NEPTUNE3D for THz source simulation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1419-1426.)
- [8] CST Inc. CST-Particle Studio[EB/OL]. (2013-05). <http://www.cst.com>.

#### 作者简介:



董 焯(1981-), 男, 西安市人, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波技术、全电磁粒子模拟方法、太赫兹微电真空器件理论与数值模拟。email:dongye0682@sina.com.

董志伟(1962-), 男, 河北省滦县人, 研究员, 研究方向为高功率微波技术、脉冲功率技术、太赫兹技术。

杨温渊(1973-), 女, 山西省平遥县人, 副研究员, 研究方向为高功率微波器件理论与数值模拟。

张 芳(1984-), 女, 河北省保定市人, 助理研究员, 研究方向为太赫兹源器件理论分析与数值模拟。

周海京(1970-), 男, 江苏省建湖市人, 副研究员, 研究方向为高功率微波技术、超宽带天线、复杂电磁环境。