



·高功率微波技术·

# 电子束长程传输中离子通道的振荡特性研究<sup>\*</sup>

薛碧曦<sup>1,2</sup>, 郝建红<sup>1</sup>, 赵强<sup>2</sup>, 张芳<sup>2</sup>, 范杰清<sup>1</sup>, 董志伟<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 离子通道可以有效抑制电子束在等离子体环境内传输过程中的径向扩散, 已有工作研究了离子通道对电子束的影响, 但离子通道建立过程和暂态特性研究则更有助于理解和利用离子通道在电子束长程传输中的作用。本文利用PIC方法对离子通道的时空分布进行二维模拟, 并基于单粒子理论推导出描述离子通道振荡的解析模型, 对上述两种模型的结果相互校验。上述模型的计算结果表明, 在长程传输过程中, 相对论电子束在等离子体内部建立的离子通道是持续周期振荡的, 电子束密度、电子束初始半径以及环境等离子体密度都会对离子通道的振荡规律产生影响, 针对不同的等离子体环境选择合适的电子束参数可以有效提高离子通道的稳定性, 进而提升传输过程中电子束的束流质量。

**关键词:** 离子通道; 等离子体环境; 长程传输; PIC模拟; 相对论电子束

中图分类号: O46

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210187

## Oscillation properties of ion channel during long-range propagation of electron beam

Xue Bixi<sup>1,2</sup>, Hao Jianhong<sup>1</sup>, Zhao Qiang<sup>2</sup>, Zhang Fang<sup>2</sup>, Fan Jieqing<sup>1</sup>, Dong Zhiwei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** It is known that the ion channel can limit the radial expansion of the electron beam during long-range propagation in the plasma environment. Previous research typically concentrated on the interaction between the beam and plasma, but research on the establishment and transient properties may lay the foundation for understanding and using the ion channel during long-range propagation. In this study, a series of 2D particle-in-cell simulations is performed and an analytical model of ion channel oscillation is constructed according to the single-particle-motion. The results show that the ion channel established by relativistic electron beam in the plasma continues to oscillate periodically during the long-range propagation of relativistic electron beam. The beam electron density, initial beam radius and the plasma density can influence the dynamics of the ion channel oscillation. Choosing suitable beam parameters based on the various plasma environment can contribute to the improvement of the stability of the ion channel and further the beam quality.

**Key words:** ion channel; plasma environment; long-range propagation; particle-in-cell simulation; relativistic electron beam

相对论电子束在大气环境内的长程传输在空间主动探测、地球磁力线追踪等多个领域具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。相对论电子束射入大气空间后, 与环境本底粒子的碰撞以及自身的空间电荷效应可能导致电子束迅速扩散, 这也是电子束在低轨环境实现长程传输面临的挑战之一<sup>[4]</sup>。一些研究表明, 电子束传输方向的地磁场可以提供箍缩力限制电子束的径向扩散<sup>[5-6]</sup>。此外, 电子束在低轨环境内传输时会不断与本底气体发生碰撞电离, 在电子束附近形成等离子体环境, 大气环境内也存在着稀薄的天然等离子体<sup>[7-9]</sup>。参数满足一定条件的电子束在这两种等离子体环境内传输时可以排出束内分布的等离子体电子, 留下的阳离子在电子束附近形成带正电的离子通道, 其提供的聚

\* 收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61372050, U1730247)

联系方式: 薛碧曦, xueb@ncepu.edu.cn。

通信作者: 赵强, zhaq@iapcm.ac.cn。

焦力可以有效抑制电子束的扩散现象<sup>[10-12]</sup>。利用离子通道保证电子束的稳定传输作为一种简单高效的方法,已被大量应用在加速器内部等封闭环境内电子束短程传输的研究中,并取得了不错的效果<sup>[13-15]</sup>。通常的做法是将离子通道假定成一规则的通道,而对离子通道的形成过程和特性未加考虑。实际中因在多种作用力的共同影响下,离子通道包络线上的电子会围绕平衡位置反复运动,形成持续振荡的离子通道,但由于离子通道的这一特性对短程传输的影响并不明显,已有报导的相关研究大多更关注电子束在离子通道内部的传输特性,鲜见针对离子通道本身变化规律的研究<sup>[16-17]</sup>。然而,在电子束的长程传输过程中,电子束的轴向分布更广,不同轴向位置的离子通道可能处于不同的振荡相位,导致离子通道呈现出一定时空分布,其对电子束传输的影响将有别于规则通道,因此有必要专门分析电子束长程传输过程中离子通道的振荡规律,提高对离子通道建立的物理过程和特性认识,将有助于发挥和利用离子通道在相对论电子束长程传输中的作用。

本文首先利用粒子模拟(PIC)方法对相对论电子束在等离子体环境的传输过程进行模拟,得到了离子通道的空间二维分布。同时基于单粒子理论,推导得出用于描述离子通道在建立初期振荡运动的解析模型。对上述两种模型的结果相互校验,总结了离子通道的不稳定性及振荡特性。

## 1 计算模型

### 1.1 PIC 计算模型

为了分析电子束传输中离子通道的建立物理过程和变化规律,本文利用空间二维、速度三维(2D3V)的PIC电磁模型模拟了相对论电子束在等离子体环境中建立离子通道的暂态过程。

PIC模拟中利用笛卡尔坐标系描述粒子的空间分布,其中 $x$ 轴为电子束传输方向, $y$ 轴为电子束的径向, $z$ 轴默认为单位长度的辅助方向。为了在提高计算效率的同时避免对称轴位置出现计算奇点,电子束采用二维片状束模型。PIC模拟区域的大小及剖分精度需针对不同的离子通道尺寸有所调整,但都满足Courant条件以保证计算结果的可靠性<sup>[18]</sup>。此外,本文的PIC模拟中利用了移动窗技术,以保证模拟区域剖分精度的同时满足对电子束长程传输距离的要求。

根据IRI电离层模型中关于大气环境内等离子体密度的相关数据<sup>[19]</sup>,并参考之前相关研究,本文计算模拟中采用的电子束及等离子体环境的基本参数如表1所示,其中 $n_b$ 是电子束束密度,引入描述束电子密度与环境等离子体密度的比值,通常认为当 $\varepsilon > 1$ 时,电子束有能力把束内的等离子体电子排出束外,形成离子体通道。为了分析离子通道的变化特征,本文主要考虑 $\varepsilon \geq 1$ ,即束密度大于等于等离子体密度的情况。相对论电子束在等离子体环境中的传输过程的PIC模拟示意图如图1所示,图中传输通道中心附近的红色部分为电子束,其周围的白色部分代表离子通道,其余等离子体构成的开放空间的等离子体电子分布用不同色标表示, $\lambda_c = 2\pi c/\omega_p$ 为离子通道的振荡波长。

表 1 电子束及等离子体环境的基本初始参数

Table 1 Initial parameters of the electron beam and plasma environment

initial beam radius $r_{b0}/\text{cm}$	initial beam energy $E_0/\text{MeV}$	initial beam emittance $\varepsilon_{\perp}/(\text{mm}^*\text{mrad})$	$\varepsilon$	plasma density $n_p/\text{m}^{-3}$
3, 5	10	0.2	1~5	$6.2 \times 10^{10} \sim 6.2 \times 10^{15}$

### 1.2 解析模型

#### (1) 离子通道振荡的平衡半径

为了匹配本文中PIC模拟的计算条件,离子通道振荡的解析模型是以束电子服从均匀分布的二维片状束的传输过程为基础构建。离子通道的径向结构如图2所示,电子束沿 $x$ 轴正向传输, $y$ 轴为电子束径向。 $r_c$ 代表离子通道振荡过程中的平衡半径, $h$ 代表离子通道的振荡位移。通道的振荡特性是由通道包络线上的电子受力和运动特性决定,下面通过考察通道包络线上任意电子的受力情况讨论通道的振荡特性。当电子束射入等离子体环境后,其在多种物理过程的共同作用下运动状态变化复杂,为了从理论中求得平衡半径,

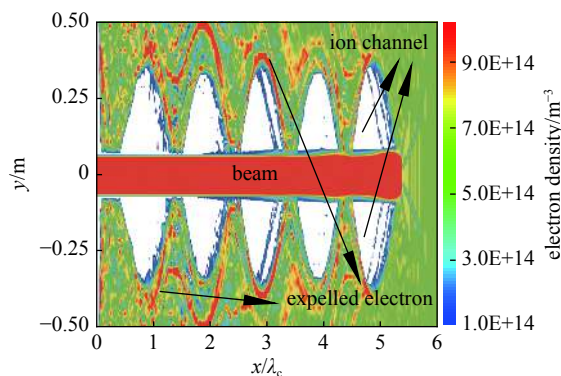


Fig. 1 Schematic of ion channel oscillation

图 1 离子通道振荡示意图

借鉴电子束短程传输中已有的研究方法,首先仅考虑电子束和离子通道的作用。对于轴向无限长的理想片状束模型,径向电场强度 $E_y$ 可近似表示为

$$E_y \approx \frac{e}{2\varepsilon_0} \int (n_p - n_b) dy \quad (1)$$

式中: $e$ 为电子带电量。当 $y = r_c$ 时,电子处于平衡状态,即电子所受径向电场力为0,将 $y = r_c, E_y = 0$ 代入式(1),可以得到 $x-y$ 坐标系下 $r_c$ 的表达式

$$r_c \approx r_{b0} \times \frac{n_b}{n_p} \quad (2)$$

## (2) 离子通道振荡的运动方程

为了进一步分析处于离子通道包络线上的电子受力和运动过程,需要分别讨论电子束、离子通道、朗缪尔振荡等物理过程的影响。受电子束斥力,等离子体电子沿 $y$ 轴正向被排离电子束。根据片状电子束轴向无限长的假设,在离子通道包络线上,电子束产生的径向电场强度为

$$E_{yb} = \frac{en_b r_{b0}}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_0$ 代表真空介电常数。

相对论电子束的轴向速度接近光速,远大于通道内阳离子的速度,因此可以认为阳离子在电子束传输过程中保持静止状态。随着等离子体电子逐渐被排离电子束,在电子束周围形成由阳离子构成的离子通道,带正电的离子通道为通道包络线附近电子提供与径向相反的吸引力。此外,在离子通道建立初期,被排出的等离子体电子(图1中等离子体环境内的红色部分)形成一定的空间分布,部分与通道边缘存在一定距离,本文称之为“排离电子”,其与通道内阳离子形成一个类似的“平板”电容器,在 $x-y$ 坐标系下,其构成的径向电场强度可近似为

$$E_{yp} = -\frac{en_p r_c}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

此外,通道外附近的等离子体受一定扰动后,等离子体电子会围绕平衡位置做朗缪尔振荡。当振幅为 $h$ 时,这种局部朗缪尔振荡在离子通道包络线上产生的径向电场为<sup>[20]</sup>

$$E_{yl} = -\frac{en_p h}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

本底等离子体频率为 $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_p}{\gamma m_e \varepsilon_0}}$  ( $m_e$ 代表电子静止质量, $\gamma$ 代表相对论因子),在上述3种物理过程的共同作用下,电子振荡的运动方程可近似为

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = (r_b \times \varepsilon - h - r_c) \times \omega_p^2 \approx -h \times \omega_p^2 \quad (6)$$

由上述分析可知,离子通道包络线上的等离子体电子围绕着平衡位置沿径向运动,形成了不断振荡的离子通道,其振荡规律与朗缪尔振荡近似相同。

为了分析电子束传输中离子通道的物理过程和变化规律,本文利用2D3V(空间二维,速度三维)的PIC电磁模型模拟了相对论电子束在等离子体环境中建立离子通道的暂态过程。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 离子通道的不稳定性

当电子束电子密度大于环境等离子体密度,即 $\varepsilon > 1$ 时,电子束可以将等离子体电子完全排出,形成纯的离子通道。图3给出了电子束传输相同时间后,3种不同情况下束头位置离子通道的分布<sup>[13]</sup>。 $x, y$ 代表了电子束传输方向及径向上的位置坐标, $\lambda_c = 2\pi c/\omega_p$ 是离子通道的振荡波长。可以看出离子通道存在明显的振荡现象,当 $\varepsilon = 1$ 时,图3(a)、(b)中的内部均出现部分等离子体电子未被排出的情况(通道内蓝色部分);当离子通道振荡至幅值最小处时,通道上下壁进入电子束内部,甚至完全闭合,这些现象表明离子通道未被稳定建立。 $\varepsilon$ 提高后,如图3(c)所

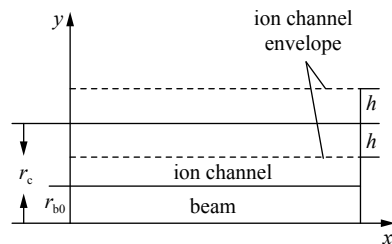


Fig. 2 Radial structure of the ion channel  
图2 离子通道的径向结构

示,尽管束头位置(最右侧)最晚建立的离子通道依旧存在上下壁完全闭合的现象,但随着离子通道建立时间的增长(即 $x/\lambda_c$ 减小),此现象有所缓解,离子通道内仅存在少量等离子体电子,离子通道稳定性明显提高。

此外,“排离电子”对离子通道的建立同样存在影响。在等离子体电子被排出通道的过程中,电子的径向动能与其初始径向分布有关,分布在电子束附近的等离子体电子具有更大的径向动能,这部分电子在振荡过程中分布在离子通道包络线外,形成“排离电子”,并以相较于离子通道更大的振幅进行振荡。当“排离电子”积累了足够的径向动能后,它们会在离子通道振荡的波峰处脱离振荡过程,在等离子体环境中继续沿径向运动,形成PIC计算结果中通道外等离子体环境中电子群聚的部分。在图3(a)中,每个离子通道的振荡周期都存在“排离电子”,并且在第一个振荡周期数量最多,因此“排离电子”对离子通道的束头位置,即离子通道建立初期影响最为明显。随着振荡次数的增加,“排离电子”的总数逐渐减少,离子通道趋于稳定。上述分析表明, $\varepsilon > 1$ 时,电子束可以在等离子体环境内建立离子通道,但离子通道可能并不稳定,电子束与环境等离子体相互作用、等离子体振荡等多种复杂过程交织一起均会对离子通道的稳定性产生影响,进而影响电子束在等离子体环境内的长程传输。

## 2.2 离子通道的振荡特性

### (1) 束电子密度对离子通道振荡特性的影响

离子通道持续振荡和不稳定性会对束流的长程传输产生一定影响,合理地控制束流参数有助于建立更适合电子束稳定传输的离子通道。图4和图5分别给出了电子束初始包络半径 $r_{b0} = 3 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 3$ 和5时离子通道的空间分布。为了校验PIC计算结果的准确性,将PIC模拟得到的离子通道分布与解析模型进行对比,考虑到解析模型中对“排离电子”的近似处理与离子通道的首个振荡周期更为接近,PIC部分的数据主要来源于电子束的束头位置,即PIC模拟中最右侧的离子通道。根据图4(b)和图5(b)中的结果,PIC模拟与理论模型的计算结果吻合良好。与图4(a)相比,图5(a)中电子束密度提高后,等离子体电子受到电子束提供的库伦斥力增大,离子通道内基本不存在残留的等离子体电子,离子通道振荡至波谷时通道上下壁闭合的情况也明显减少,离子通道更加稳定。此外,根据式(2)可知,平衡半径 $r_c$ 与电子束密度 $n_b$ 正相关, $\varepsilon$ 提高后,图5(b)中离子通道振荡的平衡半径随之增大,电子沿径向运动至平衡位置时具有更大的径向动能,因此离子通道振荡的振幅也相应增大。图4、图5的计算结果表明,在等离子体密度一定情况下合适的电子束密度有助于建立更稳定的离子通道。

### (2) 电子束初始半径对离子通道振荡特性的影响

由式(2)可知,电子束初始半径与离子通道的半径呈正比关系。其他参数与图4相同的情况下, $r_{b0}$ 增大为5 cm时离子通道的分布如图6所示。根据式(2)可知,提高电子束初始半径或电子束密度,都可以增大电子束的平衡半径,进而增大离子通道振荡的振幅,图5(b)与图6(b)中的离子通道包络均呈现出此变化规律。尽管根据理论模型分析得到图5(b)和图6(b)规律相同,但显然两种不同的参数下通道分布特性更为细致的物理图像是有差别的,如PIC模拟结果所示,即与图5(a)相比,图6(a)的离子通道内存在更多残留的等离子体电子,其原因是在图6(a)

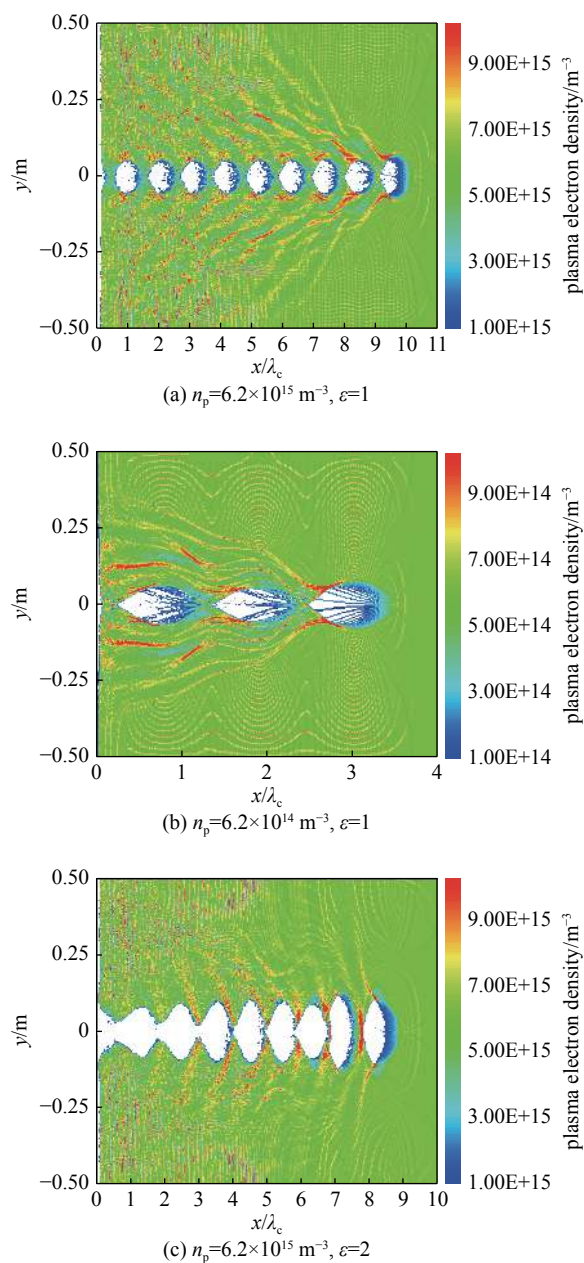


Fig. 3 Ion channel when the beam density is close to the plasma density

图3 电子束密度与等离子体密度接近( $\varepsilon$ 较小)时离子通道的分布

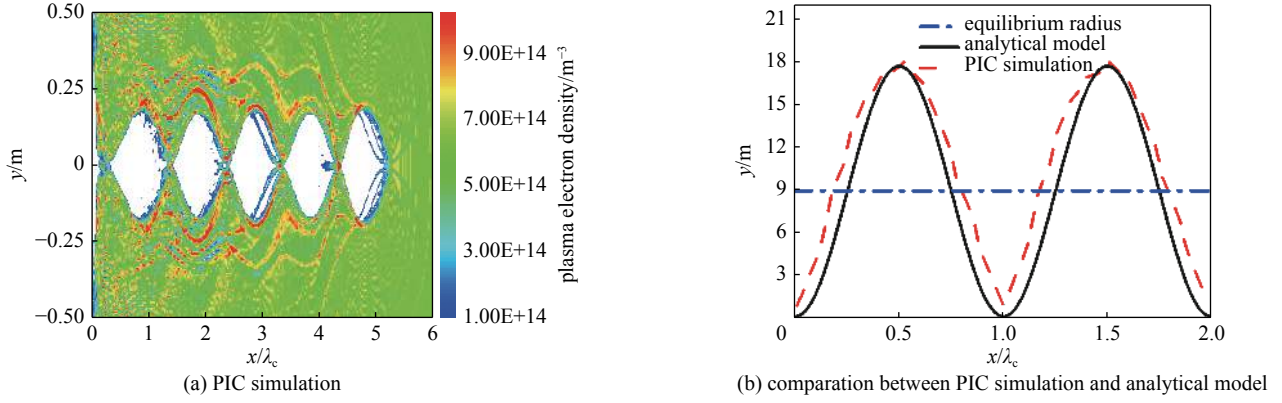


Fig. 4 Ion channel when  $\varepsilon = 3$ ,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  and  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$

图 4  $\varepsilon = 3$ 时离子通道的分布,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ ,  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$

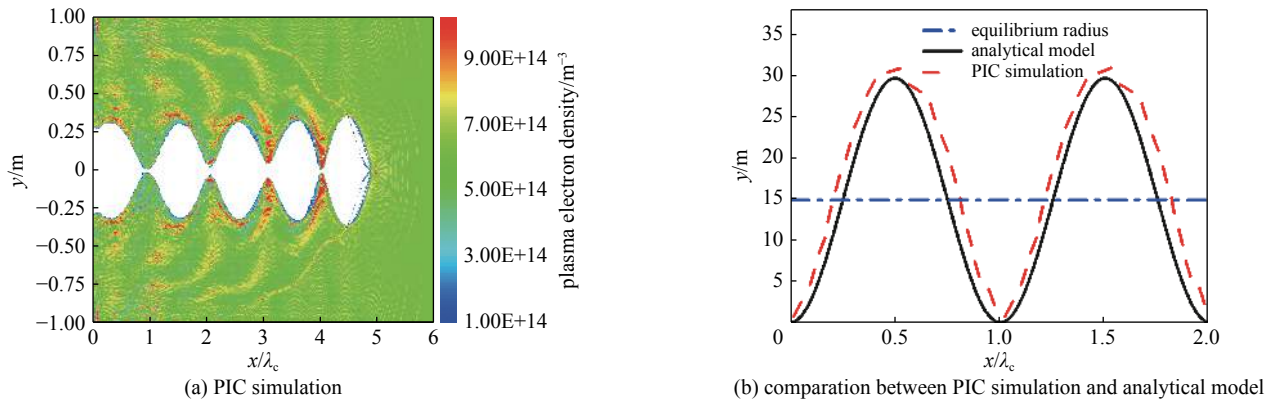


Fig. 5 Ion channel when  $\varepsilon = 5$ ,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  and  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$

图 5  $\varepsilon = 5$ 时离子通道的分布,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ ,  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$

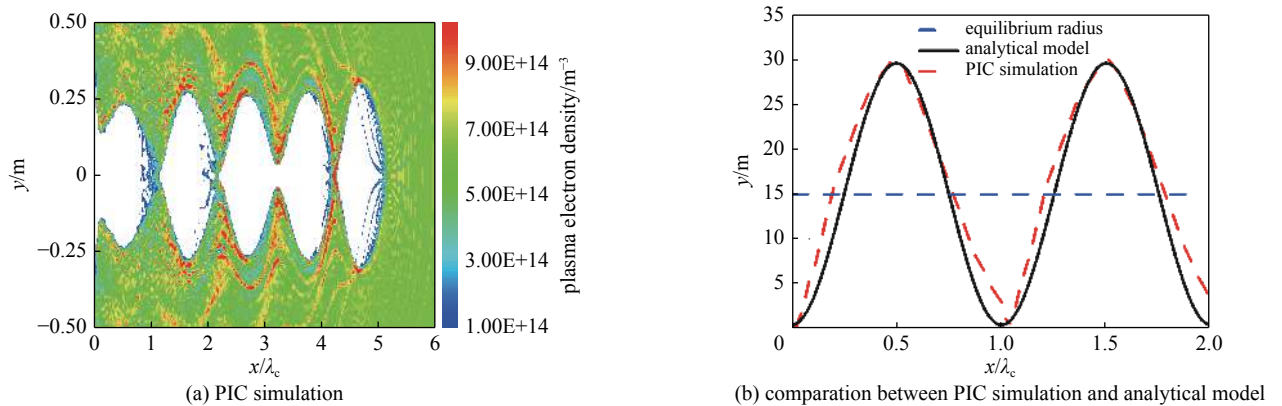


Fig. 6 Ion channel when  $r_{b0} = 5 \text{ cm}$ ,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  and  $\varepsilon = 3$

图 6  $r_{b0} = 5 \text{ cm}$ 时离子通道的分布,  $n_p = 6.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ ,  $\varepsilon = 3$

中,在离子通道振荡的波谷位置,对于较大半径的电子束,将会有更多的等离子体电子进入电子束内部,从而影响离子通道的稳定性。电子进入电子束内部后其受力情况相对复杂,解析模型并未考虑这种情况,因此图 6(b)中解析模型和 PIC 模拟两种方法的计算结果出现了一定差异。

### (3) 环境等离子体密度对离子通道振荡的影响

图 7 是图 5 中其他参数不变、等离子体密度和电子束密度同时扩大 10 倍后离子通道的分布。图 5 和图 7 中电子束初始半径及密度比值相同,因此两种情况下离子通道振荡的平衡半径  $r_c$  均为 15 cm。 $n_p$  提高后,等离子体环境的振荡频率  $\omega_p$  相应上升,根据式(6),离子通道包络上电子在相同径向位置的加速度增大,最终体现为离子通道的振荡频率上升,振幅减小,此变化规律与图 7(a)中 PIC 的计算结果相符。此外,由于振幅减小,离子通道振荡的波

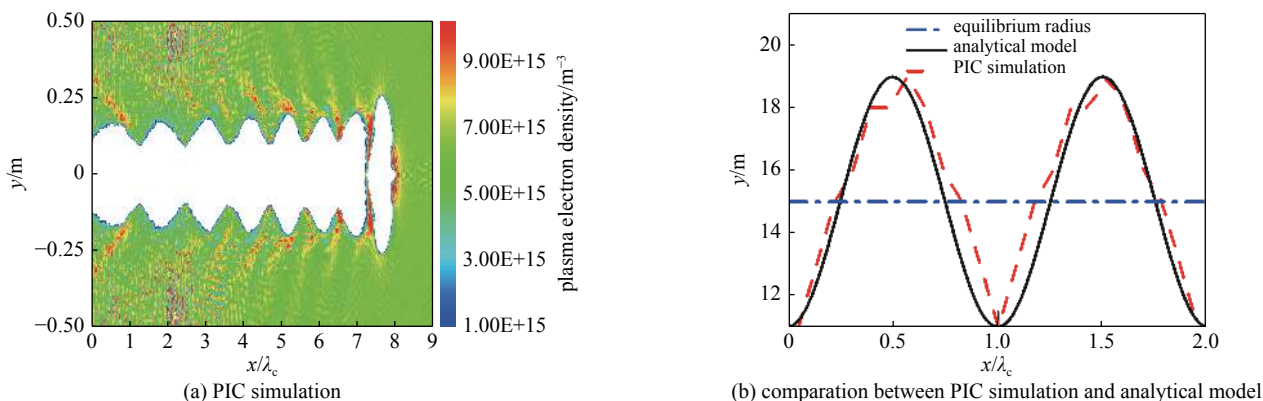


Fig. 7 Ion channel when  $n_p = 6.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ,  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$  and  $\varepsilon = 5$

图 7  $n_p = 6.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  时离子通道的分布,  $r_{b0} = 3 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 5$

谷位置距电子束的中心轴更远, 离子通道外分布了更多的“排离电子”。根据 2.1 节的分析, 这部分电子对离子通道的第一个振荡周期有明显影响, 因此在图 7(a) 的束头部分, 离子通道出现了特殊的振荡规律。

### 3 结论

相对论电子束进入等离子体环境后会将等离子体电子排开, 形成离子通道。稳定的离子通道有助于抑制电子束由于初始发射度及自生空间电荷效应导致的扩散现象, 使电子束实现在等离子体环境内的长程传输。但在电子束及等离子体的共同作用下, 离子通道持续振荡, 特殊情况下离子通道的上下壁可能在振荡的过程中完全闭合, 即通道阻断对电子束的传输造成影响, 并简要分析了可能限制电子束在等离子体环境中传输距离的不稳定性类型。本文通过 PIC 模拟结果并结合解析模型分析了影响离子通道振荡规律的因素, 但在解析模型中未考虑离子通道进入电子束内部, 甚至上下壁完全闭合的极端情况, 这也是我们下一步研究的方向。计算结果表明, 合理地控制电子束参数可以建立更加稳定的离子通道, 进而提高电子束在等离子体环境中的长程传输效率。

#### 参考文献:

- [1] Sanchez E R, Powis A T, Kaganovich I D, et al. Relativistic particle beams as a resource to solve outstanding problems in space physics[J]. *Front Astron Space Sci*, 2019, 6: 71.
- [2] Reeves G D, Delzanno G L, Fernandes P A, et al. The beam plasma interactions experiment: an active experiment using pulsed electron beams[J]. *Front Astron Space Sci*, 2020, 7: 23.
- [3] Borovsky J E, Delzanno G L. Active experiments in space: the future[J]. *Front Astron Space Sci*, 2019, 6: 31.
- [4] Krause L H. The interaction of relativistic electron beams with the near-earth space environment[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 1998: 1-77.
- [5] Xue Bixi, Hao Jianhong, Zhao Qiang, et al. Influence of geomagnetic field on the long-range propagation of relativistic electron beam in the atmosphere[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2020, 48(11): 3871-3876.
- [6] Neubert T, Gilchrist B, Wilderman S, et al. Relativistic electron beam propagation in the earth's atmosphere: modeling results[J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(9): 1009-1012.
- [7] Neubert T, Gilchrist B E. 3D electromagnetic PIC simulations of relativistic electron pulse injections from spacecraft[J]. *Adv Space Res*, 2002, 29(9): 1385-1390.
- [8] Sanford T W L. High-power electron-beam transport in long gas cells from  $10^{-3}$  to  $10^3$  Torr nitrogen[J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(6): 2539-2546.
- [9] Pal U N, Shukla P, Jadon A S, et al. Estimation of beam and plasma parameters for electron beam transport in ion-focused regime[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2017, 45(12): 3195-3201.
- [10] Buchanan H L. Electron beam propagation in the ion-focused regime[J]. *Phys Fluids*, 1987, 30(1): 221-231.
- [11] Swanekamp S B, Holloway J P, Kammash T, et al. The theory and simulation of relativistic electron beam transport in the ion-focused regime[J]. *Phys Fluids B*, 1992, 4(5): 1332-1348.
- [12] Lotov K V. Plasma response to ultrarelativistic beam propagation[J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(7): 2753-2759.
- [13] Whittum D H, Sessler A M. Ion-channel laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 64(21): 2511-2514.
- [14] Chen K R, Katsouleas T C, Dawson J M. On the amplification mechanism of the ion-channel laser[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1990, 18(5): 837-841.
- [15] Xia Yuxi, Yang Shengpeng, Chen Shaoyong, et al. Focusing characteristics of the relativistic electron beam transmitting in ion channel[J]. *Plasma Sci Technol*, 2020, 22(8): 085001.
- [16] Smith J R, Shokair I R, Struve K W, et al. Transverse oscillations of a long-pulse electron beam on a laser-formed channel[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1991,

19(5): 850-854.

- [17] 陈希, 刘盛钢, 谢文楷. 离子通道的暂态特性及其粒子模拟[J]. *电子学报*, 2000, 28(3): 61-63. (Chen Xi, Liu Shenggang, Xie Wenkai. The transient performance of ion channel and its modelling[J]. *Acta Electron Sin*, 2000, 28(3): 61-63)
- [18] Hockney R W, Eastwood J W. *Computer simulation using particles*[M]. New York: IOP Publishing Ltd, 1988.
- [19] Bilitza D, Altadill D, Zhang Yongliang, et al. The international reference ionosphere 2012—a model of international collaboration[J]. *J Space Weather Space Clim*, 2014, 4: A07.
- [20] 金佑民, 樊友三. 低温等离子体物理基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1983: 12-14. (Jin Youmin, Fan Yousan. *Fundamentals of low temperature plasma physics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1983: 12-14.)