

超宽带等离子体相对论微波噪声放大器的物理分析和数值模拟*

杨温渊[†] 董焯 孙会芳 杨郁林 董志伟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2022年10月28日收到; 2022年12月4日收到修改稿)

利用全电磁粒子模拟方法对等离子体相对论微波噪声放大器 (plasma relativistic microwave noise amplifier, PRNA) 进行了物理分析和数值模拟. 首先对无耦合时的波束色散关系进行了模拟分析, 接着计算了微波线性增长率与带宽的变化规律, 为后续整体模拟时参数的选择提供了理论依据. 最后对 PRNA 进行了整体模拟, 验证了 PRNA 在带宽和可调谐性方面的输出优势. 当等离子体束密度为 $1.4 \times 10^{19}/\text{m}^3$, 电子束电压和电流分别为 500 kV 和 2 kA, 外加磁场为 2.0 T 时, 模拟获得了功率约 200 MW, 效率为 20% 的微波输出, 辐射场频谱范围约为 7.0—9.0 GHz, 带宽达到了 2 GHz, 输出模式为同轴 TEM 模. 模拟结果还表明: 等离子体束的密度 n_p 和厚度 Δr_p 对束波色散关系影响较大, 随着 n_p 和 Δr_p 的增加, 输出微波频率呈明显上升趋势, 电子束电流和电压的变化对输出频率的影响相对较小, 等离子体束和电子束径向间距的变化则对输出频率基本没有影响. 研究结果可为器件的进一步的优化设计提供参考依据.

关键词: 相对论微波噪声放大器, 等离子体, 色散关系, 粒子模拟

PACS: 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

DOI: 10.7498/aps.72.20222061

1 引言

等离子体相对论微波噪声放大器 (plasma relativistic microwave noise amplifier, PRNA) 是一种新型等离子体相对论微波发生器 (plasma relativistic microwave generator, PRMG)^[1,2], 其工作机理为强流相对论电子束与加载具有陡峭边界的等离子体束的波导中激发的等离子体慢波发生契伦柯夫共振相互作用, 使得电子束的能量向等离子体慢波转移, 从而实现波的放大^[3,4]. 与为提高器件输出性能而填充等离子体的电真空相对论微波器件不同^[5-7], PRMG 中的等离子体束是实现器件运行的必要条件, 辐射频率的调节可以通过改变等离子体密度来实现. 通过束波互作用区结构的设

计和工作参数的选取, PRMG 能以普通放大器或振荡器形式工作, 如等离子体相对论微波放大器 (plasma relativistic microwave amplifier, PRMA)^[8] 或振荡器 (plasma relativistic microwave oscillator, PRMO)^[9], 也能够以噪声放大器的形式工作, 即 PRNA. PRNA 可以产生超宽带微波辐射, 与此同时, PRNA 还具有输出功率高和可重复频率运行等潜质. 因此, PRNA 在脉冲雷达、通信、电子对抗、物体探测、地质以及医学等诸多领域均具有良好的应用前景^[10,11].

与传统的利用快速开关直接把直流电能转换成微波输出的高功率超宽带电磁脉冲辐射源^[12] (electromagnetic pulse sources, EMPS) 相比, PRNA 具有以下优势: 不同脉冲的辐射频率可以在较大范围内变化, 且脉冲宽度不随中心频率的增加而缩短;

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875094) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yang_wenyuan@iapcm.ac.cn

单脉冲能量可以较大,甚至可以达到 10 J^[13].当然,超宽带 EMPS 无需相对论电子束,也就不需高能强流电子束源和真空电子设备,原理相对简单,成本较低.因此,可以根据实际需求,合理选取超宽带微波的产生方式.PRNA 的理论和实验研究以及输出性能的提升将可能为某些重要应用提供更适合的宽带微波源.

与同属 PRMG 器件的其他器件相比,PRMA 工作时需要微波种子源的激励,PRMO 调频方式为阶跃型调频,不能在频率区间内连续调频,阶跃宽度主要由波束相互作用区具体结构参数决定.PRNA 则可以实现在连续频谱内的调频,且无需微波种子源和反馈机制,因此结构更加紧凑.但相对于 PRMA 和 PRMO,PRNA 的提出相对较晚.2013 年和 2014 年,Ernyleva 等^[14,15]首次提出了 PRNA,数值模拟得到了频率范围为 4—17 GHz、带宽为 2 GHz、功率为 150 MW 和效率为 15% 的微波输出.随后,科学家对 PRNA 进行了进一步的理论研究,模拟得到了频率范围 2—12 GHz、功率 20 MW、效率 4%—9%^[16]和频率范围 3—9 GHz、功率 40 MW、效率约 8%^[17]的微波输出.2019 年,Strelkov 等^[13]首次进行了 PRNA 的实验研究.实验结果证实了 PRNA 产生连续谱超宽带的可行性,并获得了单脉冲 10 J 的微波能量,功率百 MW 量级,输出微波的中心频率可以通过改变等离子体束密度进行调节,频率范围为 2.0—3.5 GHz.随后,通过进一步增加等离子体束密度,实验观察到微波中心频率可以从 3 GHz 提高到 25 GHz^[18–20].

尽管科学家对 PRNA 的研究获得了令人鼓舞的实验结果,但总体来说,目前,器件输出效率低于 10%,输出功率和效率均有待进一步提高.同时,仍然有不少实验现象需要深入分析和物理解释,实验也遇到了一些问题需要解决和克服.因此需要对 PRNA 器件开展更加细致的研究,以深入理解其物理机制并获取更多的运行规律,提高其输出性能,从而更好地满足实际应用需求.

本文拟利用全电磁粒子模拟方法对 PRNA 进行物理分析和数值模拟,其中等离子体束和相对论电子束中所有的粒子均将在电磁场的作用下自洽运动.因此,可以更多地考虑等离子体中电子和离子的运动与慢等离子体波之间的耦合关系,从而更加细致地描述波束相互作用过程.通过对 PRNA 中波束相互作用区进行数值模拟,可以加深对束互作

物理机制和规律的理解和认识,同时还可以给出主要物理参数,尤其是等离子体密度、厚度以及相对论电子束电流和电压等对波束色散关系和器件主要输出特性的影响规律,为进一步优化设计器件提供参考.

第 2 节将进行物理建模,并对构建的 PRNA 模型中波束相互作用区中的色散关系进行模拟计算,同时利用已有近似解析公式^[4]对不同物理参数下的线性增长率进行计算,为后续整体模拟时参数的选择提供依据.第 3 节对构建的 PRNA 模型进行整体数值模拟,给出波束相互作用过程的典型物理图像,重点考查等离子体束密度 n_p 和厚度 Δr_p 、电子束电流和电压,以及等离子体束和电子束径向间距 Δr_{pb} 等主要物理参数对器件输出微波频率和带宽的影响规律.第 4 节对全文进行简要总结.

2 物理分析

2.1 模型介绍

图 1 为构建的将要进行模拟和计算的 PRNA 结构示意图,主要由波束相互作用区和输出区组成.由于该结构为轴对称结构,只给出了 rz 截面示意图.其中波束相互作用区包括:圆柱形金属波导 1、薄环形强流相对论电子束 2、薄环形等离子体束 3 以及粒子收集极 4;输出区是以收集极为内导体、金属波导为外导体的同轴波导.图 1 中 r_b , r_p , R_0 和 R 分别相对论电子束中心半径,等离子体束中心半径、收集极半径和波导管半径, $r_{b,p} < R$, L 为相互作用区的长度, Δr_{bp} 为等离子体束和电子束径向间距, $\Delta r_{bp} = r_p - r_b$.

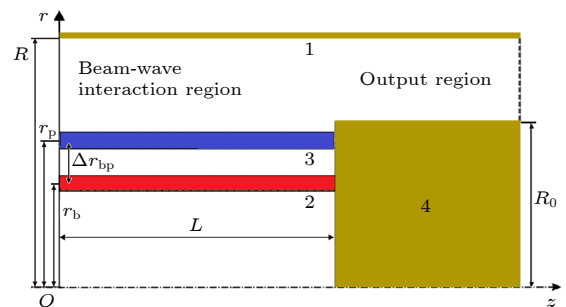


图 1 PRNA 结构示意图, rz 截面. 1, 金属波导; 2, 相对论电子束; 3, 等离子体束; 4, 粒子收集极

Fig. 1. Schematic drawing of the PRNA in the rz cross section, here 1 is the metal waveguide, 2 is the relativistic electron beam, 3 is the plasma beam and 4 is the particle collector.

模拟过程中具体参数的选取参考了相关的实验和文献 [14, 15], 除非另有说明, 选取的基本参数: 相互作用区半径 $R = 1.8$ cm, 收集极半径 $R_0 = 1.2$ cm, 环形等离子体束通过低能电子束电离气压约为 10^{-4} — 10^{-3} Torr (1 Torr = 133 Pa) 惰性气体产生 [21], 等离子体中组分为电子和氙离子, 等离子体束半径、径向厚度和密度分别为 $r_p = 1.05$ cm, $\Delta r_p = 0.1$ cm 和 $n_p = 1.4 \times 10^{19}/\text{m}^3$, 外加磁场 $B_z = 2.0$ T. 电子束电压和电流分别为 500 kV 和 2 kA, 电子束半径和径向厚度分别为 $r_b = 0.75$ cm 和 $\Delta r_b = 0.1$ cm, 电子束和等离子体束径向间距为 $\Delta r_{bp} = 0.3$ cm.

2.2 无耦合时的波束色散关系

利用全电磁粒子模拟程序计算了相互作用区中的工作模式, 即慢等离子体波的最低模式 TM_{01} (下称 P-TM_{01} 模) 的色散特性. 由于相对论电子束密度相对较小, 因此参与波束相互作用的电子束中的慢空间电荷波 (下称慢空间电荷波) 的色散曲线由解析公式 [4] 计算得到. 主要计算结果见图 2—图 4.

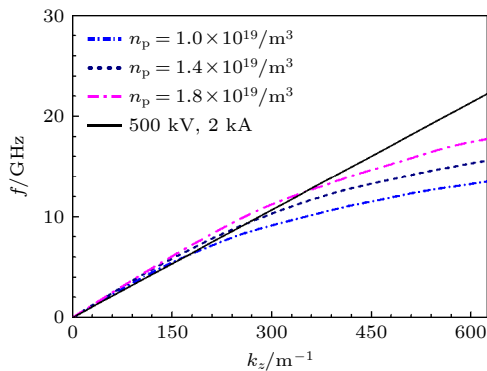


图 2 相互作用区不同等离子体密度对应的 P-TM_{01} 模与慢空间电荷波的色散关系图

Fig. 2. Dispersion relations between the P-TM_{01} modes at different plasma density and the slow space charge wave in the beam-wave interaction region.

由图 2 可以看到, 随着等离子体密度 n_p 的增加, 相同波矢 k_z 对应的 P-TM_{01} 模的频率增加, k_z 越大, 增加越明显. 其他参数不变的情况下, P-TM_{01} 模与慢空间电荷波的交点对应的共振频率随着 n_p 的增加而升高.

由图 3 可以看到, 等离子体束的厚度 Δr_p 对 P-TM_{01} 模的色散特性影响也较大, 相同波矢 k_z 对应的 P-TM_{01} 模的频率随 Δr_p 的增加而增加, k_z 越大, 增加越明显; 其他参数不变的情况下, P-TM_{01} 模与慢相对论电子束波的交点对应的共振频率随着 Δr_p 的增加而显著升高.

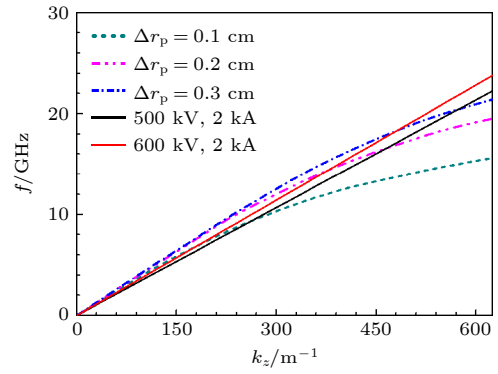


图 3 不同等离子体厚度对应的 P-TM_{01} 模与慢空间电荷波的色散关系图

Fig. 3. Dispersion relations between the P-TM_{01} modes at different plasma radial thickness and the slow space charge wave.

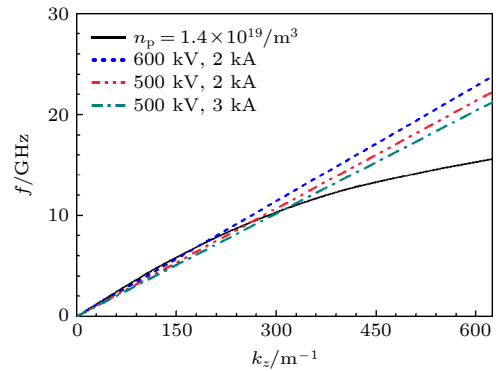


图 4 相互作用区 P-TM_{01} 模与不同电压和电流的慢空间电荷波的色散关系图

Fig. 4. Dispersion relations between the P-TM_{01} mode and slow space charge waves with different voltage and current.

由图 4 可以看到, 电子束电流强度越高, 或者电子束电压越低, 相同波矢 k_z 对应的慢空间电荷波的频率越低. 其他参数不变的情况下, P-TM_{01} 模与慢空间电荷波的交点对应的共振频率随着电子束电压的增高而有所降低, 随着电子束电流的增加而有所提高. 对比 n_p 和 Δr_p , 一定范围内, 电子束电压和电流的变化引起的共振频率的变化幅度相对较小.

综合上述研究结果: 等离子体束和电子束参数的变化均会对波束共振点的频率产生或大或小的影响, 因此实际情况下可以根据需求选取合适的物理参数.

2.3 线性增长率

辐射场的线性增长率一般定义为

$$G_L = 2\text{Im}(k_z), \quad (1)$$

即单位长度的小信号增益, G_L 反映了线性增长区波束相互作用的强度. 数值求解了文献 [4] 给出的色散方程, 得到了 G_L 随等离子体束和电子束参数的变化情况. 需要说明的是, 由于色散方程中做了较多的近似和假设, 且未考虑等离子体束内部对电磁场俘获效应, 随着频率和纵向波数 k_z 的增加, G_L 的计算误差将会增大. 图 5—图 8 展示主要物理参数变化时增益带宽曲线的变化情况, 除了图中标明的自变参数外, 其他参数保持缺省值不变. 由图 5—图 8 可以看到, PRNA 具有可以产生宽带微波输出的特性.

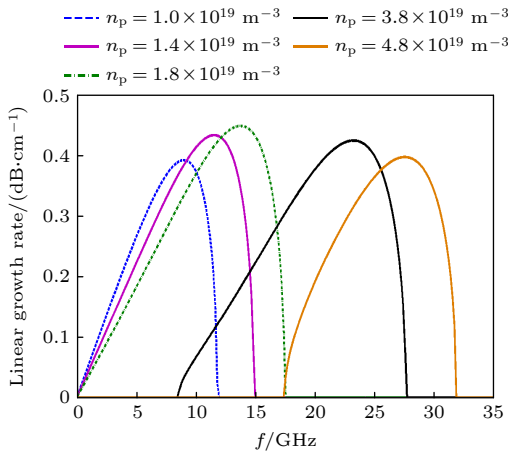


图 5 不同等离子体密度对应的线性增长率随频率的变化曲线
Fig. 5. Variations of the linear growth rate with frequency for different plasma beam density.

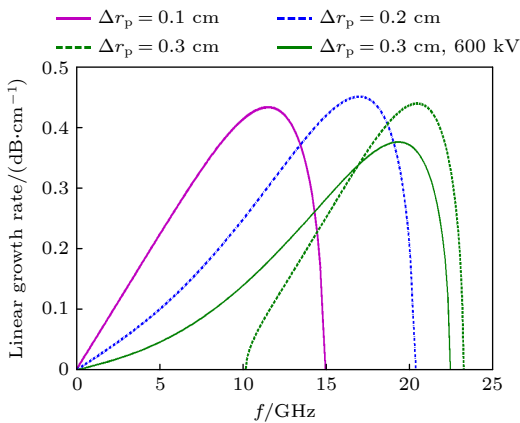


图 6 不同等离子体厚度对应的线性增长率随频率的变化曲线
Fig. 6. Variations of the linear growth rate with frequency for different plasma radial thickness.

由图 5 还可以看到, 线性增长率的峰值位置基本对应共振频率, 随着等离子体密度 n_p 的增大, 被激发的辐射场频谱范围增加, 线性增长率的

最大值对应的频率相应提高, 与色散关系图 2 所得结论一致; 同时, 在 n_p 为 $1.0 \times 10^{19} - 1.8 \times 10^{19} / \text{m}^3$ 的区间内, 束等离子体波相互作用均以单粒子效应 (single-particle Cherenkov resonance)^[21] 为主, 因此线性增长率的峰值随着 n_p 的增大而增加, 产生的微波带宽下限几乎为 0, 上限超过了共振频率. 随着 n_p 的进一步增大 (如 $n_p = 3.0 \times 10^{19} / \text{m}^3$ 和 $4.8 \times 10^{19} / \text{m}^3$), 共振频率增加, 束等离子体波相互作用由单粒子效应为主转变为集体效应 (the collective Cherenkov resonance)^[21] 为主, 因而产生的微波带宽收缩到共振频率附近. 线性增长率的峰值也逐渐减小.

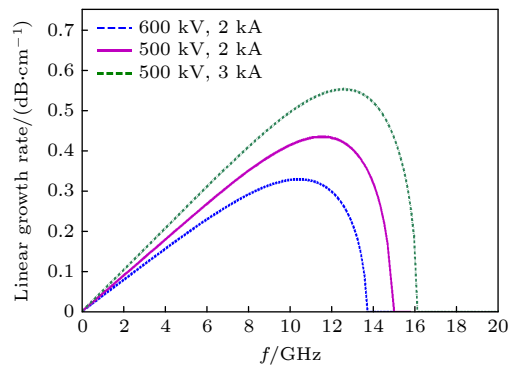


图 7 具有不同电压和电流的相对论电子束对应的线性增长率随频率的变化曲线
Fig. 7. Variations of the linear growth rate with frequency for different electron beam voltage and current.

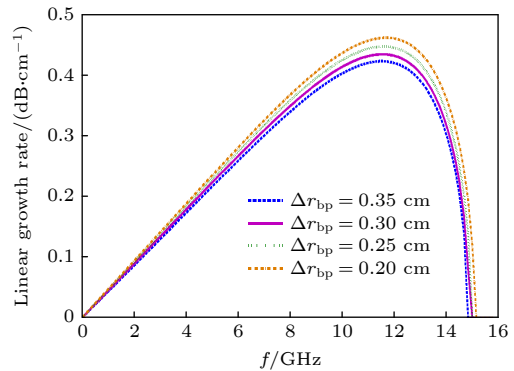


图 8 不同等离子体束和电子束径向距离对应的线性增长率随频率的变化曲线
Fig. 8. Variations of the linear growth rate with frequency for different plasma-beam radial gap.

由图 6 还可以看到, 随着等离子体厚度 Δr_p 的增加, 线性增长率峰值对应的频率显著提高, 与色散关系图 3 所得结论一致. 一定范围内, 随着 Δr_p 的增加, 被激发的辐射场频谱范围显著增加;

但随着 Δr_p 进一步增加, 辐射场频谱范围区域发生较大变化. 这是由于共振频率随着 Δr_p 的增加而显著升高, 束等离子体波相互作用由单粒子效应为主转变为集体效应为主, 因而产生的微波带宽收缩到共振频率附近.

如果电子束电压增加到 600 kV, 对于相同的径向厚度 $\Delta r_p = 0.3$ cm 时, 由于共振频率的降低 (参见图 3 电子束电压增加到 600 kV 时的色散曲线), 束等离子体波相互作用由集体效应为主转回到单粒子效应为主. 此时, 产生的微波带宽下限几乎为 0, 上限超过共振频率 (见图 6 电子束电压为 600 kV 时的增益带宽曲线).

上述计算结果表明, 为了获得超宽带输出, 在 PRNA 设计时需要合理地选取相对论电子束参数和等离子体束参数, 如果需要覆盖低频段, 则需要使器件工作在单粒子效应为主的参数区间.

由图 7 不难看出, 随着电子束电压增加, 被激发的辐射场频谱范围略有减小, 线性增长率的最大值降低, 对应频率有所降低. 随着电子束电流增加, 辐射场频谱范围增加, 线性增长率的最大值增加, 对应频率有所提高, 频率的变化情况与色散关系图 3 所得结论一致.

由于我们是通过改变电子束半径 r_b 来改变 Δr_{bp} 的值, 等离子体束中心半径 r_p 保持不变, 因此 Δr_{bp} 的改变对等离子体慢波 P-TM₀₁ 的色散特性没有影响. 由图 8 可以看到, 当 Δr_{bp} 减小时, 被激发的辐射场频谱范围基本保持不变. 但随着 Δr_{bp} 的减小, 电子束逐渐靠近等离子体束, 参与波束相互作用的 P-TM₀₁ 的纵向电场增大, 波束相互作用增强, 线性增长率有所增加.

以上计算和分析表明: 1) PRNA 具有产生宽带微波输出的优势; 2) 通过改变等离子体束的密度和厚度、电子束电压和电流等相关物理量, 可以方便地调节束波相互作用共振点对应的频率. 因此, PRNA 同时具有良好的可调谐性.

3 模拟结果和讨论

为了证实 PRNA 在带宽和可调谐性方面的输出优势, 下面将利用全电磁粒子模拟程序对其进行整体数值模拟. 首先选取相对论电子束脉冲的形状为梯形脉冲, 电子束脉宽小于电磁波在相互作用区往返传输一次所需的时间, 以确保相互作用区端口可能的微波反射不参与波束相互作用, 这里取电子束总脉

宽为 2 ns, 上升沿和下降沿各为 0.5 ns, 束波相互作用区长度 $L = 35$ cm, 除非另有说明, 其他参数同 2.1 节给的缺省值.

下面给出主要的模拟结果, 包括粒子在实空间和相空间的相位图、不同时刻相互作用区和输出区径向电场和轴向电场的等高图、输出功率时间演化图及其频谱图等. 同时将给出主要物理参数的变化对输出性能的影响情况, 并与前面分析结果进行比较.

3.1 基本物理图像

图 9 和图 10 为不同时刻等离子体束中电子、离子以及电子束电子在实空间和相空间中的相位图. 可以看到, 在时间为 1.689 ns 时, 相对论电子束的动量已经出现明显的调制效果, 到 2.295 ns 时动量调制进一步加剧, 电子束达到了强群聚状态, 电子束密度出现明显群聚现象, 此时波束互作用程度加剧, 产生的辐射场强度将大幅增加. 等离子体中的电子动量也随着辐射场的增加出现振荡, 与相对论电子束动量振荡频率一致. 由于离子质量远大于电子质量, 因此离子状态几乎没有发生变化.

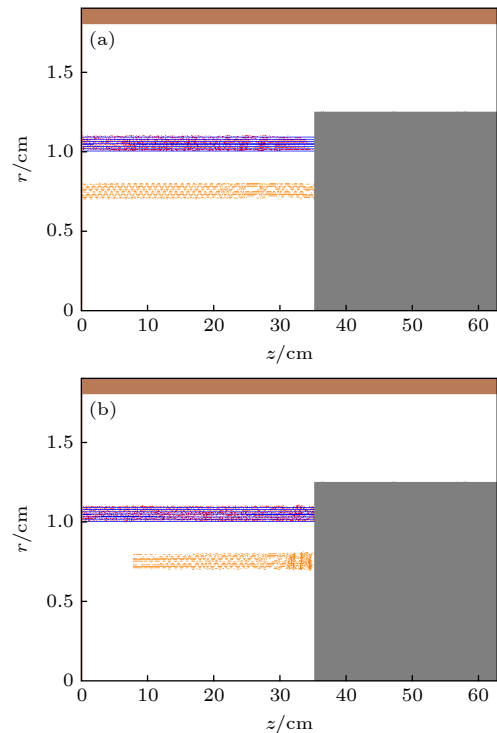


图 9 不同时刻等离子体电子 (红色) 和离子 (蓝色)、电子束电子 (橙色) 在实空间中的分布图 (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 2.295$ ns

Fig. 9. Real space plot of the plasma electrons (red) and ions (blue), and beam electrons (orange) at different times: (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 2.295$ ns.

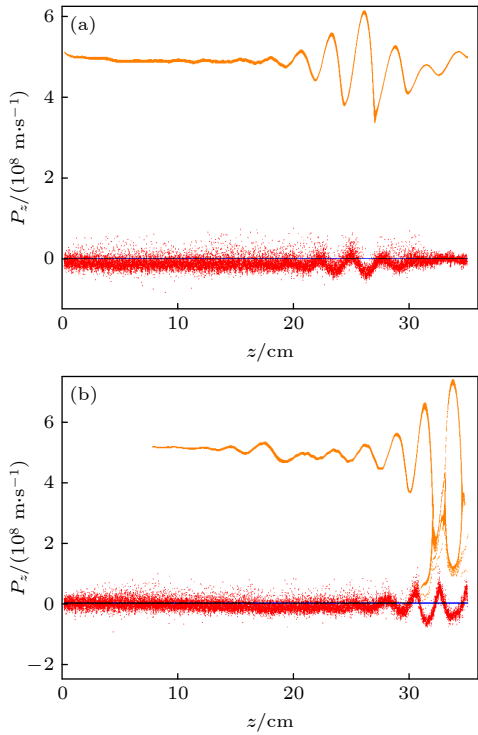


图 10 不同时刻等离子体电子 (红色) 和离子 (蓝色)、电子束电子 (橙色) 在相空间中的分布图 (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 2.295$ ns
 Fig. 10. Phase space plot of the plasma electrons (red) and ions (blue), and beam electrons (orange) at different times: (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 2.295$ ns.

图 11—图 13 分别为不同时刻波束相互作用区和输出区轴向和径向电场的等高图. 通过图 11—图 13, 可以看到辐射场产生、发展和耦合输出的过程. 其中, 由图 11 和图 12 可知, 相互作用区电磁场

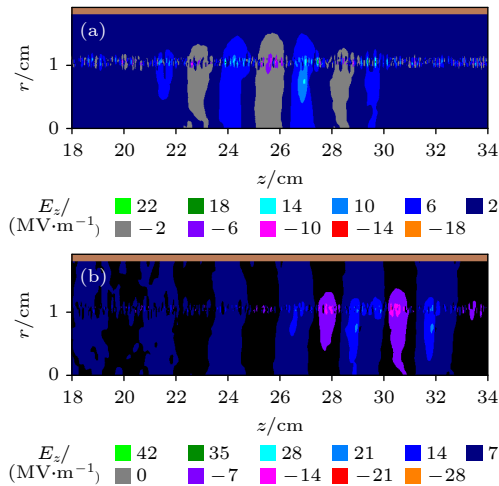


图 11 不同时刻相互作用区纵向截面轴向电场的等高图 (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 1.916$ ns
 Fig. 11. Contour plot of the electric field E_z in the interaction region at different times: (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 1.916$ ns.

分布与 P-TM₀₁ 模的本征场分布完全一致; 由图 12 和图 13 可以看到, 相互作用区和输出区的径向电场基本自然过渡, 圆柱波导中的 P-TM₀₁ 模转化为同轴 TEM 模输出.

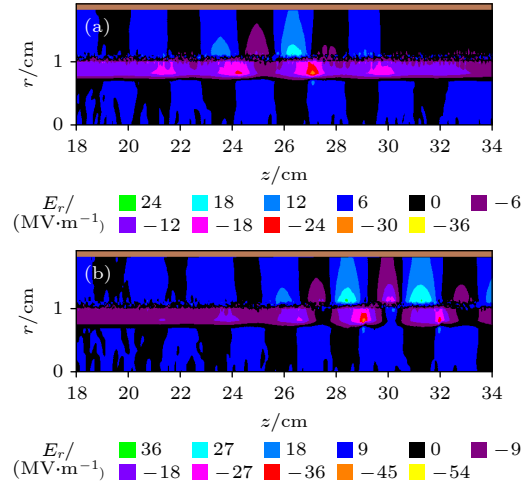


图 12 不同时刻相互作用区纵向截面径向电场的等高图 (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 1.916$ ns
 Fig. 12. Contour plot of the electric field E_r in the interaction region at different times: (a) $t = 1.689$ ns; (b) $t = 1.916$ ns.

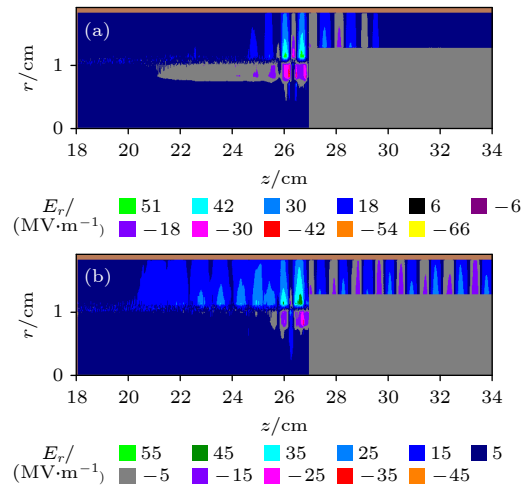


图 13 不同时刻输出区纵向截面径向电场的等高图 (a) $t = 2.295$ ns; (b) $t = 2.975$ ns
 Fig. 13. Contour plot of the electric field E_r in the output region at different times: (a) $t = 2.295$ ns; (b) $t = 2.975$ ns.

图 14 和图 15 给出了瞬时输出功率和平均功率随时间的变化曲线及其 FFT 变化图, 数值证实了 PRNA 作为一种高功率宽带器件的可行性. 从图 14 和图 15 可知, 瞬时输出功率接近 600 MW, 平均峰值功率达到 200 MW, 功率效率达到了 20%. 图 16 给出了输出区辐射场 E_r 随时间的变化曲线

及其 FFT 变化图, 可以明显观察到, 辐射场频率范围约从 7.0 GHz 到大于 9.0 GHz, 带宽达到了 2 GHz 左右.

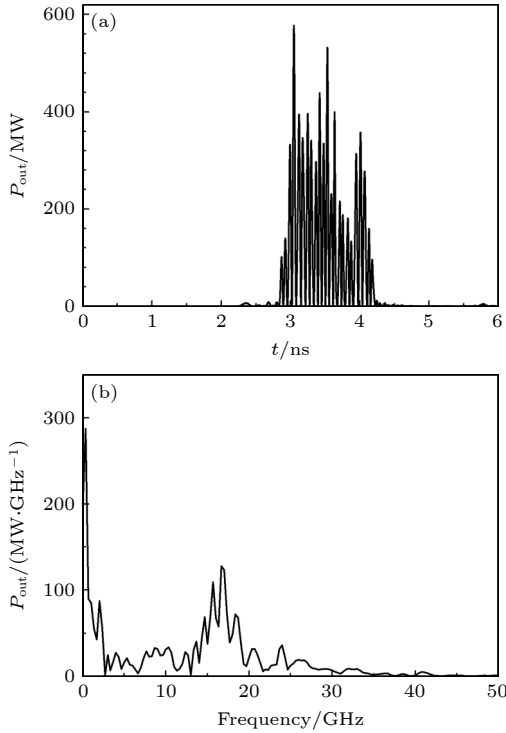


图 14 瞬时输出功率随时间的变化曲线 (a) 及其 FFT 变换图 (b)

Fig. 14. Time plots of (a) the instantaneous and (b) the corresponding Fourier transform.

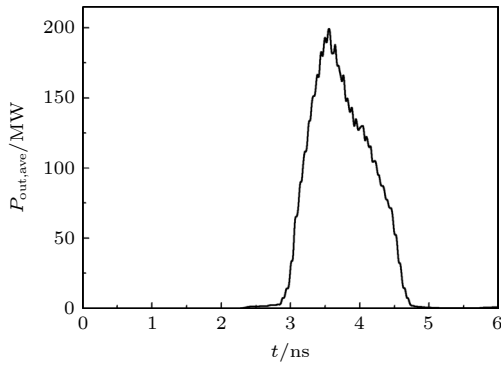


图 15 周期平均输出功率随时间的变化曲线

Fig. 15. Time plots of the periodic-average output power.

3.2 主要物理参数对输出特性的影响

本节将通过改变等离子体密度和厚度、相对论电子束电压和电流以及等离子体束和电子束径向间距等主要物理参数的取值范围, 对 PRNA 进行了全电磁粒子模拟并对模拟结果进行总结和分析, 以获得上述参数的变化对 PRNA 输出性能的影响规律, 重点考虑对带宽和频率的影响.

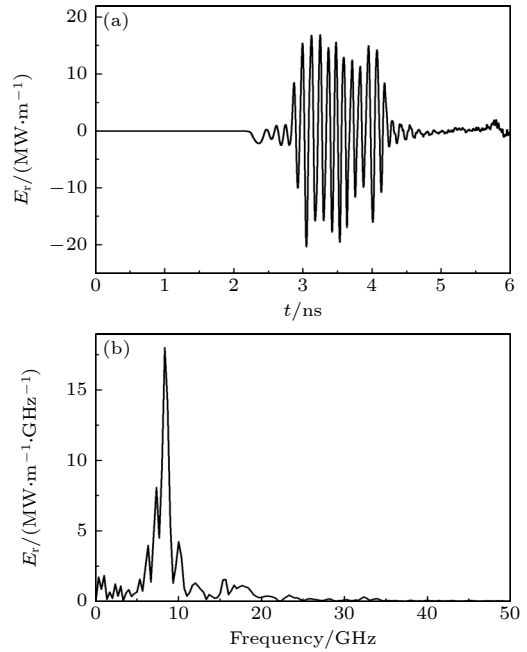


图 16 输出区辐射场 E_r (a) 随时间的变化曲线及其 (b) FFT 变换图

Fig. 16. Variations of E_r (a) with time and (b) the corresponding Fourier transform in the output region.

图 17 和图 18 分别给出了输出微波频谱与效率随等离子体密度的变化图. 从图 17 和图 18 可以看到, 随着等离子体密度的增加, 输出微波频率呈上升趋势, 中心频率约从 7.0 GHz 提高到 10 GHz, 变化趋势与前面无耦合时色散关系的模拟结果一致. 保持其他参数不变的情况下, 尤其是波束相互作用区长度固定时, 在一定等离子体密度范围内, 微波输出效率保持大于 15%.

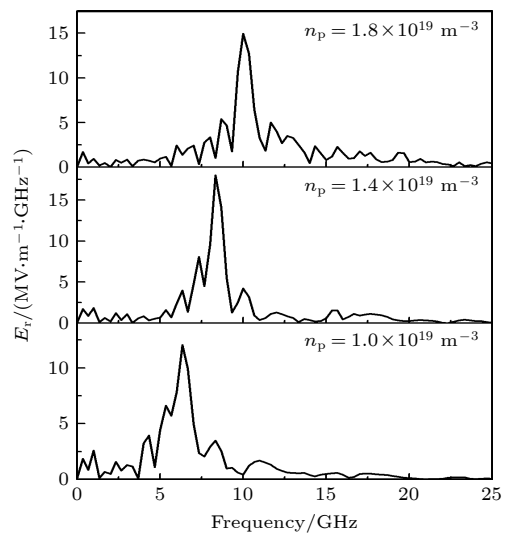


图 17 输出微波频谱随等离子体密度的变化

Fig. 17. Variations of the output frequency spectrum with different plasma density.

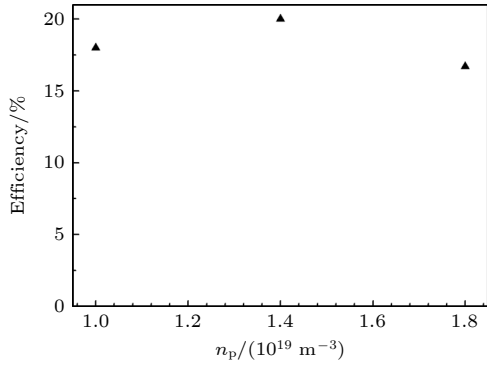


图 18 输出效率随等离子体密度的变化

Fig. 18. Variations of the output efficiency with different plasma density.

图 19 给出了输出微波频谱随等离子体厚度的变化图. 从图 19 可以看到, 随着等离子体厚度的增加, 输出微波频率显著提高, 等离子体束径向厚度从 0.1 cm 增加到 0.3 cm 时, 中心频率约从 8.3 GHz 提高到 17.5 GHz, 变化趋势与前面无耦合时色散关系的模拟结果一致. 由于波束相互作用区长度 L 固定, 输出效率随等离子体束厚度的增加而明显减小. 但通过对 L 的优化, 输出效率仍然能够达到约 20%.

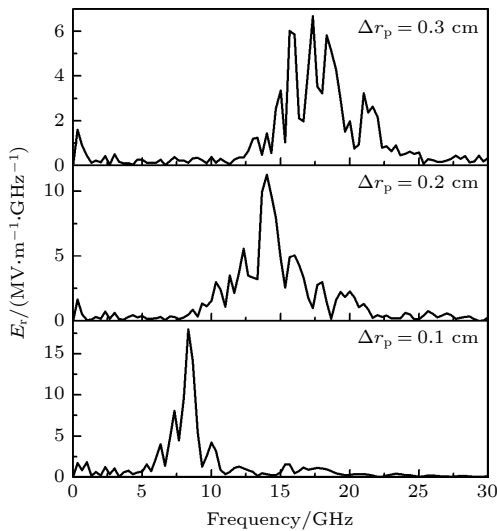


图 19 微波频谱随等离子体束厚度的变化

Fig. 19. Variations of the output frequency spectrum with different plasma radial width.

图 20 和图 21 给出了输出微波频谱随电子束电压和电流的变化图. 从图 20 和图 21 可以看到, 输出频率随着电子束电压的增加而降低, 随着电子束电流的增加而升高, 与前面的冷腔分析一致. 但与等离子体密度和厚度相比, 一定范围内, 电流和

电压的变化对输出频率的影响比较小, 因此只能作为频率调节的辅助手段. 对于给定的电子束电流和电压, 由于波束相互作用区长度 L 存在最优值, 因此, 当 L 固定时, 输出效率随电子束电压和电流的变化

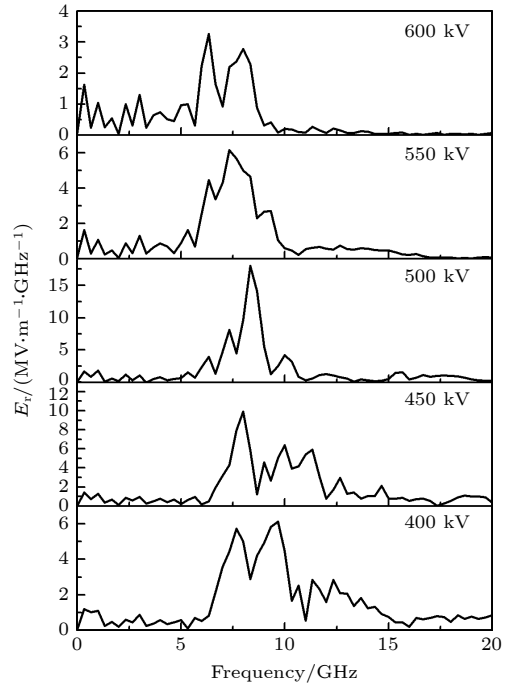


图 20 微波频谱随电子束电压的变化

Fig. 20. Variations of the output frequency spectrum with different beam voltage.

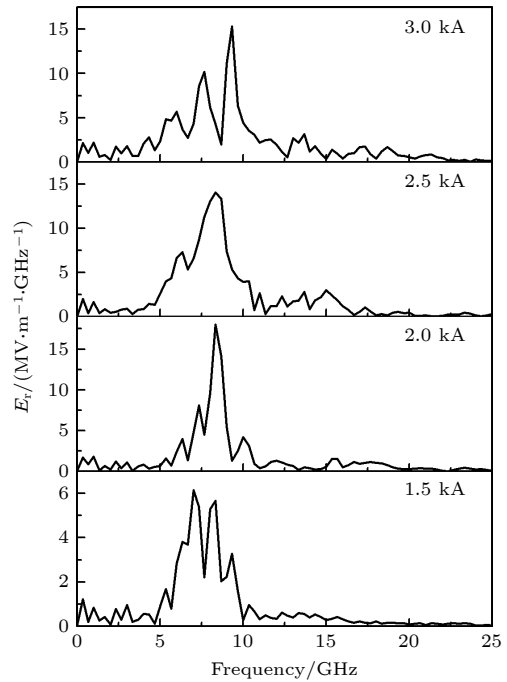


图 21 输出微波带宽随电子束电流的变化

Fig. 21. Variations of the output frequency spectrum with different beam current.

而减小. 但通过对 L 的优化, 一定变化范围内, 输出效率能够达到约 20%.

模拟结果表明, 一定范围内径向间距 Δr_{bp} 对输出微波频率的影响很小, 中心频率基本保持不变, 但对输出效率有一定影响. 图 22 给出了输出微波效率随 Δr_{bp} 的变化情况, 可以看到, 尽管没有随着 Δr_{bp} 的变化对 L 进行优化, 但输出效率均超过了 15%.

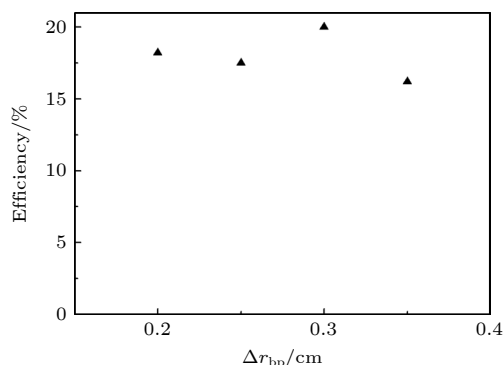


图 22 输出效率随等离子体束和电子束径向间距的变化
Fig. 22. Variations of the output efficiency with different plasma and electron beam gaps.

4 结 论

利用全电磁粒子模拟方法对 PRNA 进行了物理分析和数值模拟. 首先利用全电磁粒子模拟方法对无耦合时的波束色散关系进行了模拟分析. 结果表明 PRNA 具有良好的可调谐性, 通过改变等离子体束的密度和厚度、电子束电压或电流等相关物理量, 可以方便地调节束波相互作用共振点对应的频率. 接着利用近似解析公式得到了微波线性增长率与带宽的变化规律. 在上述模拟和分析的基础上, 对 PRNA 进行了整体模拟, 验证了 PRNA 在带宽和可调谐性方面的输出优势, 得到了相关物理参数对器件主要输出特性的影响规律. 当等离子体密度为 $1.4 \times 10^{19}/\text{m}^3$, 外加磁场为 2.0 T 时, 电子束电压和电流分别为 500 kV 和 2 kA, 模拟获得了功率约 200 MW, 效率为 20% 的微波输出, 辐射场频谱范围约为 7.0—9.0 GHz, 带宽达到了 2 GHz 左右, 输出模式为同轴 TEM 模. 模拟结果还表明, 等离子体束的密度 n_p 和厚度 Δr_p 对束波色散关系

影响较大, 随着 n_p 和 Δr_p 的增加, 输出微波频率呈明显上升趋势. 当等离子体束径向厚度从 0.1 cm 增加到 0.3 cm 时, 中心频率约从 8.3 GHz 提高到 17.5 GHz. 电子束电流和电压的变化对输出频率的影响相对较小, 因此改变电子束电流和电压只能作为频率调节的辅助手段. 等离子体束和电子束径向间距的变化则对输出频率基本没有影响. 以上研究结果可为器件的进一步优化设计提供参考.

参考文献

- [1] Kuzelev M V, Mukhametzyanov F Kh, Rabinovich M S, Rukhadze A A, Strelkov P S, Shkvarunets A G 1982 *Sov. Phys. JETP* **56** 780
- [2] Kuzelev M V, Loza O T, Ponomarev A V, Rukhadze A A, Strelkov P S, Shkvarunets A G, Ulyanov D K 1996 *Sov. Phys. JETP* **82** 1102
- [3] Bogdankevich I S, Kuzelev M V, Rukhadze A A 1981 *Sov. Phys. Usp.* **24** 1
- [4] Kuzelev M V, Rukhadze A A 2000 *Plasma Phys. Rep.* **26** 231
- [5] Carmel Y, Lou W R, Antonsen Jr T M, Rodgers J, Levush B, Destler W W, Granatstein V L 1992 *Phys. Fluids B* **4** 2286
- [6] Shkvarunets A G, Kobayashi S, Weaver J, Carmel Y, Rodgers J, Antonsen Jr T M, Granatstein V L, Destler W W, Ogura K, Minami K 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2045
- [7] 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]
- [8] Ponomarev A V, Strelkov P S, Shkvarunets A G 1998 *Plasma Phys. Rep.* **24** 48
- [9] Strelkov P S, Ulyanov D K 2000 *Plasma Phys. Rep.* **26** 303
- [10] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwaves Sources and Technologies* (New York: Institute of Electrical and Electronic Engineer, Inc.) pp25–27
- [11] Prather W D, Baum C E, Torres R J, Sabath F, Nitsch D 2004 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **46** 335
- [12] Huan Y N, Ren G G 2002 *J. Microwaves* **18** 90 (in Chinese) [黄裕年, 任国光 2002 微波学报 **18** 90]
- [13] Strelkov P S, Tarakanov V P, Mikh D E D, Ivanov I E, Shumeiko D V 2019 *Plasma Phys. Rep.* **45** 345
- [14] Ernyleva S E, Litvin V O, Loza O T, Bogdankevich I L 2013 *Prob. At. Sci. Technol.* **2013** 3
- [15] Ernyleva S E, Litvin V O, Loza O T, Bogdankevich I L 2014 *Tech. Phys.* **59** 1228
- [16] Ernyleva S E, Loza O T 2017 *Phys. Wave Phenom.* **25** 56
- [17] Ulyanov D K, Bogdankevich I L, Ernyleva S E, Andreev S E 2019 *Plasma Phys. Rep.* **45** 980
- [18] Kartashov I N, Kuzelev M V 2021 *Plasma Phys. Rep.* **47** 548
- [19] Buleyko A B, Ponomarev A V, Loza O T, Ulyanov D K, Andreev S E 2021 *Phys. Plasmas* **28** 023303
- [20] Buleyko A B, Ponomarev A V, Loza O T, Ulyanov D K, Sharypov K A, Shumailov S A, Yalandin M I 2021 *Phys. Plasmas* **28** 023304
- [21] Kuzelev M V, Loza O T, Rukhadze A A, Strelkov P S, Shkvarunets A G 2001 *Plasma Phys. Rep.* **27** 669

Physical analysis and numerical simulations of ultra wideband plasma relativistic microwave noise amplifier*

Yang Wen-Yuan[†] Dong Ye Sun Hui-Fang Yang Yu-Lin Dong Zhi-Wei

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

(Received 28 October 2022; revised manuscript received 4 December 2022)

Abstract

The physical mechanism and output properties of the plasma relativistic microwave noise amplifier (PRNA) are studied numerically by using the all electromagnetic particle-in-cell (PIC) code. Firstly, the dispersion relation between the operating mode and the slow space charge wave of relativistic electron beam without coupling is simulated and analyzed. Simulation results show that both the plasma density n_p and radial thickness Δr_p affect the dispersion characteristics markedly and their increasing can lead the frequency at the beam-wave resonant point to be enhanced. The beam voltage and current also affect the resonant frequency, but the effect is relatively slight. Secondly, variation of the linear growth rate and the bandwidth are then evaluated by using the linear theory. Calculations show that the PRNA has the virtue of wideband output. Its bandwidth can reach a GHz level. By adjusting the plasma parameters n_p and Δr_p , the relativistic electron beam voltage and current, the operating frequency can be tuned over a wide frequency range. Therefore the PRNA also has virtue of fine frequency tunability. Based on the above calculation results, the whole PIC simulations of the PRNA are then carried out to verify the virtues of wideband microwave output and frequency tunability. The basic features of the field distributions of the operating in the evolution process and out coupling process are given. The bunching process and the energy release process of relativistic electron beam are also plotted. Simulations show that with a plasma density of $1.4 \times 10^{19} / \text{m}^3$, beam voltage and current of 500 kV and 2 kA and applied magnetic field of 2.0 T, 200 MW output microwave with efficiency about 20% can be obtained. The frequency ranges from about 7.0 to 9.0 GHz, the band width reaches 2 GHz. And the output mode is the TEM mode of the coaxial waveguide. Both n_p and Δr_p affect the dispersion relations markedly and the output frequency increases clearly with n_p and Δr_p increasing. The influence of beam voltage and current on the output frequency are both relatively small and the gap distance between the plasma and electron beam has little effect on the output frequency. The research results will provide useful reference for further designing the PRNA.

Keywords: relativistic microwave noise amplifier, plasma, dispersion relation, numerical simulation

PACS: 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

DOI: 10.7498/aps.72.20222061

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875094).

[†] Corresponding author. E-mail: yang_wenyuan@iapcm.ac.cn



超宽带等离子体相对论微波噪声放大器的物理分析和数值模拟

杨温渊 董烨 孙会芳 杨郁林 董志伟

Physical analysis and numerical simulations of ultra wideband plasma relativistic microwave noise amplifier

Yang Wen-Yuan Dong Ye Sun Hui-Fang Yang Yu-Lin Dong Zhi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 058401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222061

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222061>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

相对论强激光与近临界密度等离子体相互作用的质子成像

Proton imaging of relativistic laser-produced near-critical-density plasma

物理学报. 2019, 68(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190610>

热化学模型对高超声速磁流体控制数值模拟影响分析

Numerical analysis of influence of thermochemical model on hypersonic magnetohydrodynamic control

物理学报. 2019, 68(17): 174702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190378>

高超声速磁流体力学控制霍尔效应影响

Influence of Hall effect on hypersonic magnetohydrodynamic control

物理学报. 2020, 69(21): 214703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200630>

基于电流积分计算磁矢量势修正的低磁雷诺数方法

An improved low magnetic Reynolds magnetohydrodynamic method based on computing induced magnetic vector potential by integrating induced current

物理学报. 2020, 69(13): 134702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200091>

微波谐振腔低气压放电等离子体反应动力学过程

Reaction dynamic process of low pressure discharge plasma in microwave resonant cavity

物理学报. 2022, 71(24): 240702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221385>

螺旋波等离子体中螺旋波与Trivelpiece-Gould波模式耦合及线性能量沉积特性参量分析

Parametric analysis of mode coupling and liner energy deposition properties of helicon and Trivelpiece-Gould waves in helicon plasma

物理学报. 2020, 69(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200062>