

W 波段带状注扩展相互作用速调管注波互作用系统

陈姝媛^{1,2,3}, 阮存军^{1,4*}, 王勇¹, 张长青¹, 钟勇¹, 赵鼎¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190;

2. 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 北京航空航天大学, 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:对 W 波段带状注五间隙耦合腔的高频结构进行了设计与分析, 以一个五间隙耦合腔作为输入腔, 一个五间隙耦合腔作为输出腔, 构成了 W 波段 SBEIK 的注波互作用系统, 利用 CST 粒子工作室对整个注波互作用系统进行了三维计算模拟, 并用 Magic 3D 对注波互作用计算进行了验证, 结果表明两种 PIC 软件的计算结果基本一致. 该 SBEIK 在电子注电压为 75 kV、电流为 4 A 条件下, 仅用两个腔体在 W 波段实现了高于 24 dB 的增益, 为下一步高增益、高效率、小型化、紧凑型 SBEIK 的设计奠定了坚实的基础.

关键词:带状注; 扩展相互作用速调管; 注波互作用; W 波段

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A

Interaction system of W-band sheet beam EIK

CHEN Shu-Yuan^{1,2,3}, RUAN Cun-Jun^{1,4*}, WANG Yong¹, ZHANG Chang-Qing¹,
ZHONG Yong¹, ZHAO Ding¹

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematical, Beijing 100076, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of electronic and information engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: RF structure of W-band sheet beam EIK has been designed in this paper. The interaction system consists of two five-gap cavities, one is used for input cavity, the other is output cavity. The whole beam wave interaction system has been calculated and simulated by two kinds of 3D-PIC software, and the results agree well. Beam voltage of the SBEIK is 75 kV, and beam current is 4 A. The gain of whole tube is higher than 24 dB, which is only consisted of two resonant cavities. If there are more cavities, the tube will get higher gain. This is a big progress and is very useful for the design of multi-cavities SBEIK.

Key words: sheet beam, EIK, beam wave interaction, W band

PACS: 41.75.-i, 84.40.Fe, 13.40.-f, 07.57.-c

引言

W 波段作为重要的毫米波大气窗口之一, 已在雷达、通信、制导、电子对抗等方面有着广泛的应用^[1]. 对于传统的圆柱形的微波真空电子器件, 由

于其输出功率与频率的平方成反比, 严重制约着其在高频段的高功率输出. 带状注速调管(SBK)采用宽高比很大的薄矩形电子注, 降低了电流密度和空间电荷效应, 从而大大降低了对聚焦磁场的要求. 更为重要的是, SBK 输出功率与频率的一次方成反比,

收稿日期: 2014-02-27, 修回日期: 2015-02-02

Received date: 2014-02-27, revised date: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(61222110, 60971073, 61172015)

Foundation items: National Science Foundation of China (61222110, 60971073, 61172015)

作者简介(Biography): 陈姝媛(1989-), 女, 湖南永州人, 博士研究生, 主要从事新型高功率微波源与技术的研究. E-mail: shuyuan0808@hotmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: ruancunjun@tsinghua.org.cn

突破了几何尺寸与工作频率的共度性限制,使其在毫米波段可以获得高功率输出^[2]. 扩展相互作用速调管(EIK)采用多间隙耦合谐振腔的结构,使其能够承载较高的峰值功率和平均功率,避免了高频击穿;同时特性阻抗比单腔增大了很多,提高了注波相互作用效率. 而 SBEIK 兼顾了 SBK 和 EIK 的优点,不仅能有效地避免高频击穿,并且能在高频段产生高功率的输出,因而成为近几年国内外的研究热点^[3-6].

速调管的注波相互作用系统在很大程度上决定了整管的输出功率、相互作用效率等,是微波放大器器件的核心部分. SBEIK 的注波相互作用过程是一个复杂的非线性的物理过程. 目前,只能通过三维 PIC 仿真软件对其进行研究. 普通的带状注速调管可以通过增加腔体的个数来提高整管的增益,但是腔体个数过多,将导致注波相互作用长度变长,聚焦磁场不容易设计,带状电子注易出现扭曲变形. 本文设计的 W 波段 SBEIK 在兼顾增益和效率的情况下,有效地减少了腔体的个数和注波相互作用的长度,仅用两个多间隙耦合腔实现了较高的增益,为下一步设计具有更高增益更高效率的 SBEIK 奠定了基础. 本文首先对应用于 W 波段的 SBEIK 的高频结构进行了研究,根据 EIK 同步条件计算了腔体的周期;其次,利用 CST 粒子工作室对注波相互作用系统进行了三维粒计算模拟,并用 Magic 3D 对注波相互作用计算进行了验证,两种 PIC 软件的计算结果基本一致. 本文计算了输出功率、增益与输入功率的关系,找到了增益最大点;实现了仅用两个腔体就达到 24 dB 的增益,大大缩减了注波相互作用段的距离.

1 SBEIK 高频系统的设计

1.1 理论分析

SBEIK 一般采用多间隙耦合腔构成高频谐振系统. 多间隙耦合腔不仅可以提高注波相互作用的效率,更能有效地防止高频击穿. 本文采用五间隙哑铃型分布作用耦合谐振腔的结构,其三维结构图如图 1 所示;其 XZ 截面及 XY 截面图如图 2 所示. 关于带状注哑铃型谐振腔的基本设计及各个尺寸参数的敏感性分析,在文献[7]有详细讨论. 本文主要研究作为 EIK 的最重要的同步特性,因为电子注与高频场的同步与否将直接影响注波相互作用的效率. 首先,电子束的直流电压与电子速度的关系为:

$$\frac{v_z}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{U_0}{511}\right)^2}}, \quad (1)$$

式中, c 为光速; U_0 为电子注的直流电压,单位为 kV.

根据 EIK 的工作原理,当工作在 2π 模的时候,电子与波的不同步要求是当电子从一个间隙运动到另一个间隙所需要的时间正好是电磁波的 m 个周期;即满足

$$\beta_e P < m\pi, \quad (2)$$

其中

$$\beta_e = \frac{\omega}{v_z}. \quad (3)$$

由于本文所选取的工作模式为 2π 模,所以式(2)中 m 取 2, P 为多间隙腔的周期;由 $\beta_e P = 2\pi$ 计算出 P 值为 1.554 mm,再根据式(2),选择多间隙腔的周期 P 值为 1.5 mm.

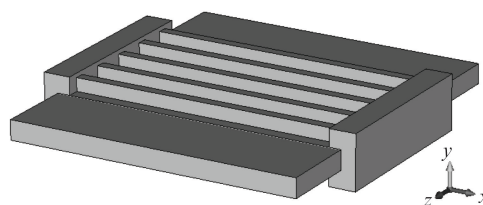


图 1 五间隙哑铃型耦合谐振腔三维图
Fig. 1 3D view of five gap dumbbell resonant cavity

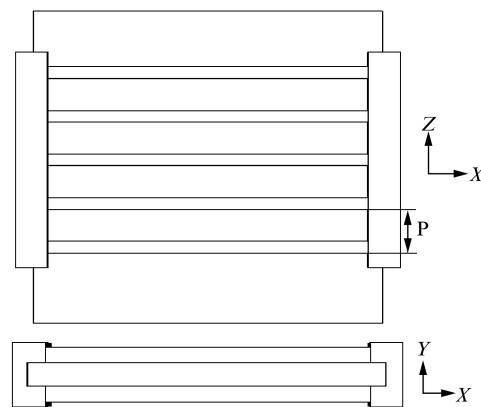


图 2 五间隙哑铃型耦合谐振腔 XZ 截面及 XY 截面图
Fig. 2 XZ section and XY section plan of five-gap dumbbell cavity

1.2 高频系统的设计

根据设计原则:(1) 腔体谐振频率优化到整管的工作频率,工作模式选择为 2π 模;(2) 尽量保证场强均匀性,以提高注波相互作用的效率;(3) 模式间隔尽量大,抑制非工作模式;(4) Q 值满足设计要求;(5) 获得尽可能大的特性阻抗;(6) 防止高频击穿. 经过一系列优化设计后,五间隙耦合腔腔体的谐振频率为 94.5 GHz,特性阻抗 R/Q 为 60 Ω ,固有品质因数 Q_0 为 1 370.5,外 Q 值为 500,加载 Q 值为 367. 由于整管设计目标是高功率、高增益,于是将两

个谐振腔的腔体尺寸、频率设计一致. 由一个五间隙耦合输入腔和一个五间隙耦合输出腔构成注波相互作用系统, 如图 3 所示; 其本征模式下的 E_z 的场强分布如图 4 所示, 两个五间隙腔都工作在 2π 模. 图 5 给出了由 Magic 和 CST 两种三维软件计算的 E_z 沿轴向的场强分布, 两者的计算结果基本一致.

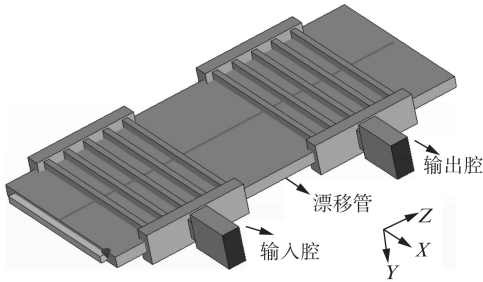


图 3 带状注 EIK 高频系统三维图

Fig. 3 Three-dimensional view of RF system for sheet beam EIK

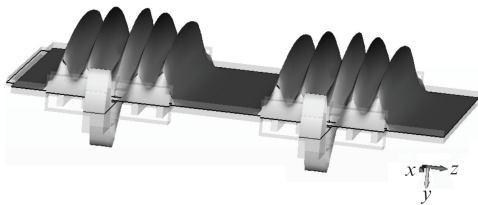


图 4 本征模式下 E_z 沿 z 方向的场强分布图

Fig. 4 2π -mode axial electric field distribution (E_z) of RF system for sheet beam EIK

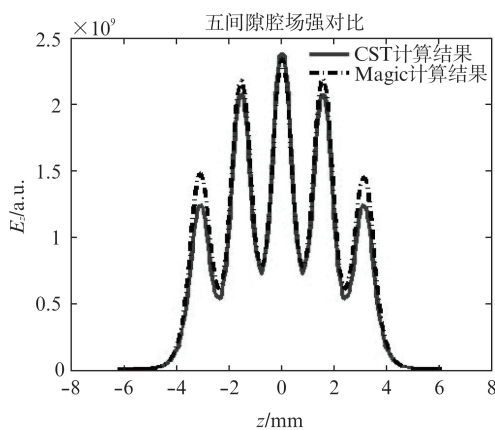


图 5 CST 与 Magic 的计算的场强对比图

Fig. 5 Results calculated by CST software and MAGIC3-D

2 W 波段 SBEIK 注波互作用的 PIC 模拟

2.1 电子的群聚

根据运动学理论, 在忽略空间电荷波效应的情

况下, 电子注在经过输入腔时被激励信号所调制, 在经过一段漂移距离之后, 在输出腔间隙处形成密度很大的电子团, 由于电子注和间隙处的场相位同步发生注波相互作用, 这时电子将自身携带的动能转化为高频微波能量. 当调制电压 V_1 比直流电压小很多的时候, 即小信号的情况下, 通过运动学理论可以求解出漂移管内的电子在不同时刻总电流 I 为:

$$I = I_0 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2J_n(nX) \cos n(\omega t - \theta_0) \right], \quad (4)$$

$$I_1 = 2I_0 J_1(nX) \cos n(\omega t - \theta_0), \quad (5)$$

式中, J 表示贝塞尔函数, I_0 表示直流分量, I_1 表示基波电流分量, 从式 (4) 中看出电子注除了直流分量, 还携带着丰富的高频分量, 如果在高频谐波分量的最大处放置输出腔, 将会得到很大的功率输出. 式 (4) 中, 当 n 取 1 的时候, 就得到群聚电子注的基波电流分量 (式 5 所示). 根据贝塞尔函数的性质, 当 $X = 1.84$ 时, J_1 达到最大值, $J_1(X) = 0.58$, 电流基波分量的最大值 $I_{1\max} = 1.16 I_0$.

然而对于实际工作中功率速调管的群聚问题, 空间电荷效应不可忽略, 器件在大信号状态下工作, 且存在非线性效应, 因此需要用大信号理论对速调管的群聚过程进行分析. 在大信号理论分析中, 电流基波分量的最大值可以实现 $I_{1\max} > 1.16 I_0$; 在多腔速调管的大信号分析中, 基波电流与直流之比 (即调制系数 a) 达到了 1.5^[8]. 由于 SBEIK 是一种非轴对称结构, 需要进行全三维的计算, 而注波相互作用是一个非线性的物理过程, 准确描述难度大. 为了精确地计算求解 SBEIK 的注波相互作用过程, 采用两种三维 PIC 软件对其进行计算仿真, 分别是 CST 粒子工作室与 Magic 3D 软件. 两者的计算结果有较好的一致性, 进一步验证该注波相互作用系统设计的准确性和稳定性.

2.2 W 波段 SBEIK 的注波相互作用研究

根据 SBEIK 的设计要求 (电压 75 kV, 电流 4 A, 中心频率 94.5 GHz, 漂移管通道 12 mm × 0.8 mm, 带状电子注 10 mm × 0.5 mm, 两腔 20 dB 增益, 带宽不作要求), 通过前述过程对腔体的冷腔参数确定好后, 就可以利用 PIC 三维软件进行注波相互作用系统的粒子模拟仿真. 输入腔、输出腔之间的漂移段距离是通过计算基波电流来确定的. 可以先利用 PIC 软件计算电子注经过输入腔后在漂移段内基波电流沿电子注运动方向的变化情况, 寻找基波电流的最大值的位置, 确定为输出腔的位置, 然后计算整个注波相互作用段. 所设计的 SBEIK 工作电流为 4 A, 图 6

给出了归一化的基波电流及高次谐波电流随 Z 方向(电子注运动方向)的变化图. 由于使用了多间隙腔结构, 电子的群聚效果得到了进一步加强, 基波电流分量可以实现 $I_1/I_0 > 1.16$. 由图 6 可以看出, 一次谐波与直流之比 I_1/I_0 在输出腔的位置达到了最大值 1.48. 在基波电流最大值处放置输出腔, 可以实现最佳的能量交换.

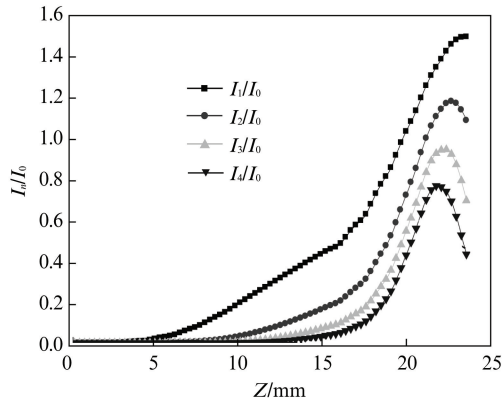


图 6 电子注归一化运动电流的谐波分量沿 Z 方向距离的变化
Fig. 6 Normalized beam current I_n/I_0 -versus-circuit distance plot

首先用 CST 粒子工作室对注波相互作用段进行了 PIC 模拟, 计算结果如图 7 所示. 图 7(a) 显示了电子注的运动情况, 可以看出在输出段, 电子发生了明显的群聚; 图 7(b) 显示了电子注刚从电子枪发射出来时能量是 75 keV, 经过第一个五间隙谐振腔后, 电子受到了一定的调制, 经过漂移管到达输出腔的时候, 电子受到了进一步的剧烈调制, 少部分电子被加速, 大部分电子减速, 高频场能量得到了放大; 图 7(c) 显示了当输入功率为 45 W 时, 稳定后可以产生 14 kW 的功率. 另外, 对输出信号做频谱分析, 得到了单一的谱线, 在工作频率 94.5 GHz 下, 腔体没有激励起其他的模式.

通过改变输入功率的大小, 计算输入功率与输出功率, 以及与增益、效率的关系, 如图 8 所示. 当输入功率从 0.5 W 变化到 128 W 的过程中, 输出功率一直处于增长趋势; 在输入功率较小的时候, 输出功率和输入功率成近似线性增长关系; 当输入功率增大到一定值以后, 输出功率开始出现饱和; 而增益随着输入功率的变化呈现出先增大后减小的趋势, 输入功率在 0.5 W 到 70 W 之间, 增益都达到了 23 dB 以上. 其中, 当输入功率为 18 W 时, 增益达到了最大值 24.875 dB. 如果需要提高增益, 只需再增加几个腔体

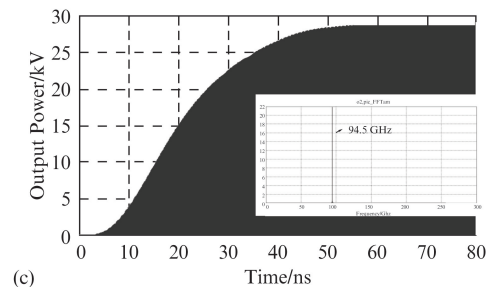
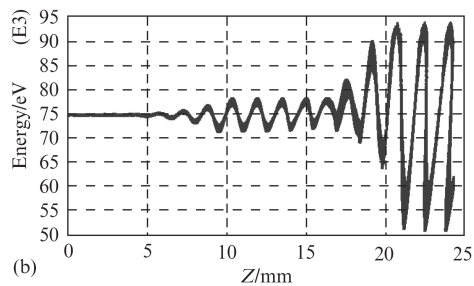
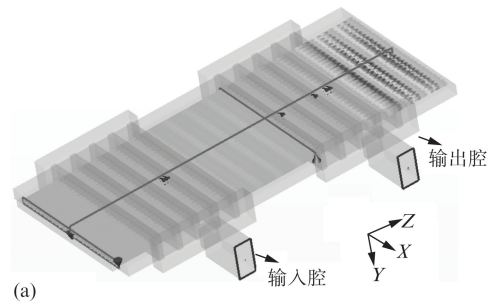


图 7 CST 粒子工作室 PIC 计算结果 (a) 粒子群聚图, (b) 能量图, (c) 输出功率图
Fig. 7 Results calculated by CST particle studio (a) Particle trajectories, (b) Particle energy, (c) Output power

即可. 当输入功率为 18 W 时(即增益最大时), 计算了其频率响应特性, 如图 9 所示, 带宽为 30 MHz, 可以看出本文设计的是一种窄带高功率 EIK.

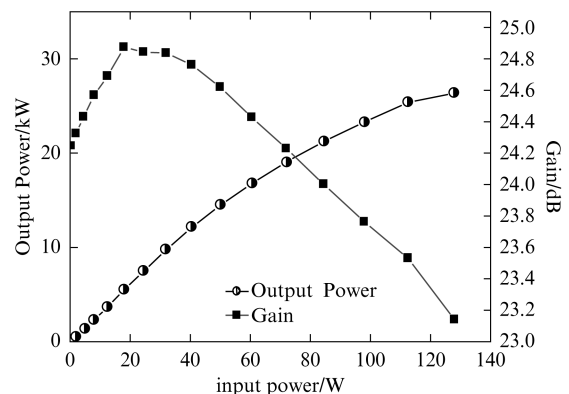


图 8 PIC 三维仿真计算得到的功率增益图
Fig. 8 Saturated output power and gain versus input cavity by PIC 3D simulation

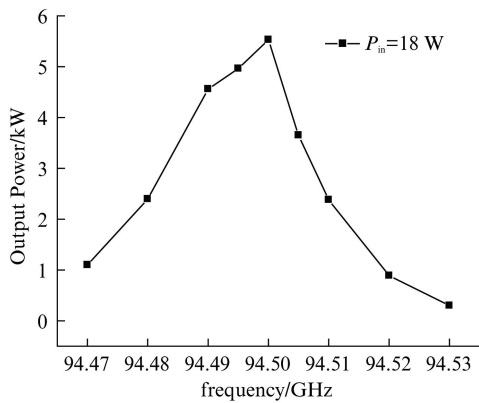


图9 输入功率为 18 W 时的功率-频率响应图
Fig. 9 Saturated output power versus frequency when input power is 18 W

3 W 波段 SBEIK 注波相互作用计算的验证

为了进一步验证计算结果的准确性,利用 Magic 3D 软件对 SBEIK 的注波相互作用段进行计算. 计算结果如图 10 所示,图 10(a)为电场 E_z 在 XZ 截面的分布,图 10(b)为中心电场沿 Z 方向的分布. 从图 10(a)和(b)可以看出,沿 Z 方向,SBEIK 工作在 2π 模,并且电场主要集中在间隙部分,而在漂移管中迅速截止,有利于电子注在间隙处发生能量交换. 另外,高频场能量通过磁耦合的方式从耦合口传递到输出波导. 从图 11(a)可以看出电子经过输出腔时发生了群聚,在这个过程中,电子注的动能经过输出腔时的变化关系如图 11(b)所示,大多数的电子在

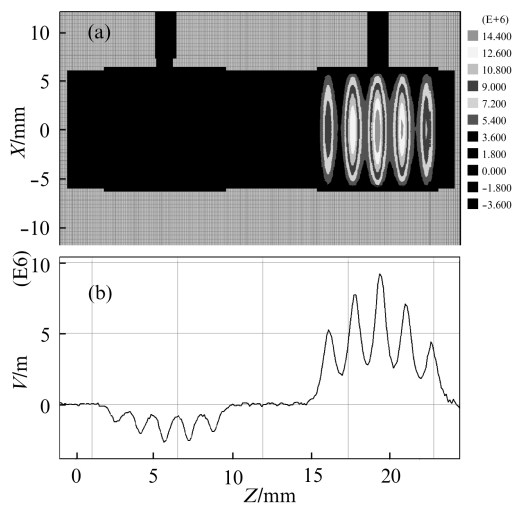


图 10 Magic 的 PIC 三维仿真结果 (a) 电场 E_z 沿 XZ 截面场型图, (b) 中心电场沿 Z 方向的分布
Fig. 10 Simulation results from Magic 3D (a) axial electric field distribution (E_z) in $x-z$ plane (at $y = 0$), (b) E_z as a function of axial distance for sheet beam EIK

间隙处减速,这样电子注的平均动能降低,将自身能量转化成了高频能量,从输出波导输出. 图 12 给出了电压频谱图,可以看出频谱很纯净,其它杂模没有振荡起来. 图 13 给出了不同的输入功率下,两种 PIC 软件计算的饱和输出功率图. 由图 13 可见,当

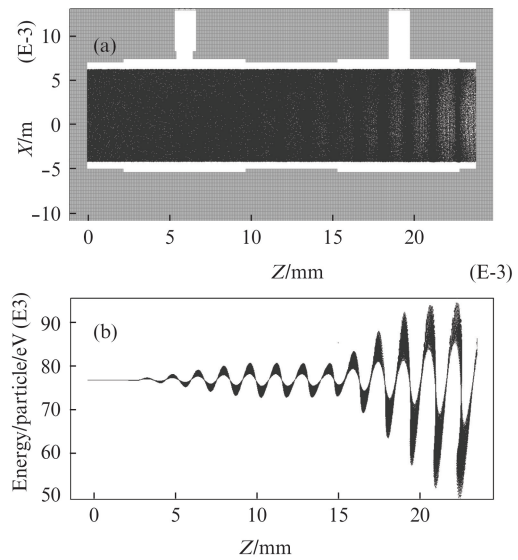


图 11 (a) 粒子群聚图, (b) 能量变化图
Fig. 11 (a) Particle trajectories, (b) particle energy

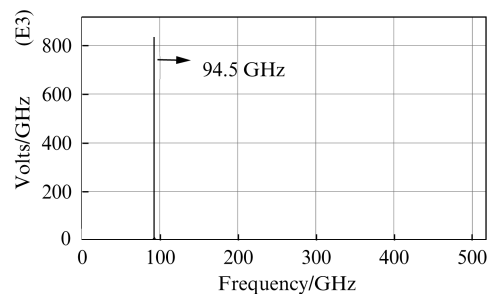


图 12 电压频谱图
Fig. 12 Frequency spectrum

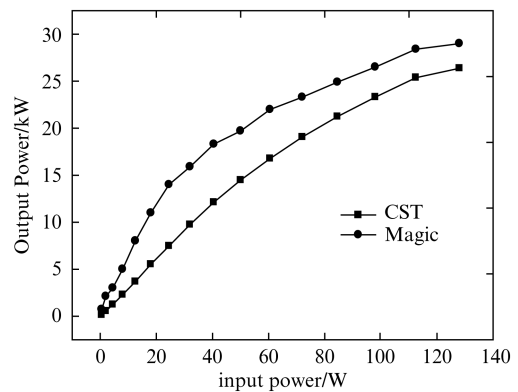


图 13 两种 3D-PIC 粒子软件输出功率计算对比图
Fig. 13 Saturated output power versus input cavity by two kinds of PIC 3D software

输入功率较小时,器件工作在线性区;当输入功率达到一定时,器件工作在非线性区.由于两个软件本身的网格及算法有区别,所以结果有一定的差别,但趋势基本一致,这进一步验证了 SBEIK 注波相互作用系统设计的正确性.

4 结论

利用两个五间隙哑铃型耦合腔构成了 SBEIK 注波相互作用系统,用运动学理论和大信号模拟软件对基波电流的最大值进行分析研究,通过计算基波电流最大值,确定了输出腔的最佳位置,首先用 CST 粒子工作室对双腔带状注 EIK 的整个注波相互作用段进行了三维模拟,并进一步研究了增益与输入功率的关系以及增益最大时的带宽图.最后用 Magic 3D 对注波互作用的计算进行了验证,计算结果有较好的一致性.实现了仅用两个多间隙谐振腔就达到了 24 dB 的高增益,为以后高增益、紧凑型器件的设计研究奠定了坚实的基础.进一步的工作是开展更高增益、高效率的多腔带状注 EIK 的研究,以及高增益带状注 EIK 的稳定性问题的研究.

References

- [1] Roitman A, Berry D, Steer B. State-of-the-art W-band extended interaction klystron for the cloudsat program [J]. *IEEE Transactions on Electron devices*, 2005, **52**(5): 895 - 898.
- [2] ZHANG Xiao-Feng, RUAN Cun-Jun, LUO Ji-Rui, *et al.* Beam-wave interaction and simulation program for sheet beam klystron [J]. *Acta Phys. Sin.* (张小锋,阮存军,罗积润,等.带状注速调管注波相互作用及其计算程序的研究. *物理学报*), 2011, **60**(06): 84021 - 84029.
- [3] Nguyen K T, Pasour J, Wright EL, *et al.* Design of a G-band sheet-beam extended-interaction klystron [C]. In *IEEE International Vacuum Electronics Conference*. 2009: 298 - 299.
- [4] Pasour J, Nguyen K T, Wright E L, *et al.* Demonstration of a 100-kW solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Electron devices*, 2011, **58**(6): 1792 - 1797.
- [5] Chen S Y, Ruan C J, Zhang C Q, *et al.* Design of multi-gap extended output cavity for W band sheet beam EIK [C]. In *IEEE International Vacuum Electronics Conference*. 2013: 1 - 2.
- [6] WU Yang, XU Zhou, ZHOU Lin, *et al.* Simulation and design of a W-band extended interaction klystron amplifier [J]. *Acta Phys. Sin.* (吴洋,许州,周霖,等. *物理学报*), 2012, **61**(22): 41011 - 41015.
- [7] CHEN Shu-Yuan, RUAN Cun-Jun, RUAN Wang, *et al.* RF structure and the cavity characteristics of W-band sheet beam klystron [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (陈姝媛,阮存军,阮望,等. *红外与毫米波学报*) 2012, **31**(4): 360 - 366.
- [8] XIE Jia-Lin, ZHAO Yong-Xiang. *Bunching theory of klystron* [M]. Beijing: Science Press (谢家麟,赵永翔. *速调管群聚理论*). 北京: 科学出版社, 1966: 190 - 191.
- [1] Roitman A, Berry D, Steer B. State-of-the-art W-band extended interaction klystron for the cloudsat program [J].