

文章编号: 1001-4322(2008)01-0113-05

螺旋线慢波结构高频特性的简化模拟方法^{*}

唐康淞^{1,2}, 赵刚^{1,2}, 吴文状^{1,2}, 李实¹, 阴和俊¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用 3D 电磁仿真软件 HFSS 中的 Master/Slaver 边界条件, 基于螺旋线慢波结构的角向周期性, 提出了一种改进的高频特性仿真方法。将具有 3 根夹持杆的螺旋线慢波结构的仿真模型从 1 个螺距的长度缩小到了 1/3 个螺距。仿真结果表明: 采用改进后的模型, 计算所得的相关高频特性参数与改进前传统模型所得结果基本一致, 但是运算时间减少了至少 3/4, 且频率越高, 计算时间上的优势越大。

关键词: 高功率微波; 行波管; 螺旋线慢波结构; 高频特性; HFSS 软件

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A

行波管是微波/毫米波电真空器件中最重要的器件之一^[1]。在行波管中, 慢波结构是进行注波互作用、实现能量交换的核心部件, 它直接决定了行波管的性能。然而, 对于复杂的 3 维慢波结构尤其是螺旋线慢波结构, 其参数相速度、轴向耦合阻抗以及衰减的精确计算非常困难。

相对于引入较多假设的解析方法, 利用 3D 电磁场仿真软件如 MAFIA, CST MWS 以及 HFSS 在一定程度上能够克服假设近似引入的误差, 取得比较精确的结果。以美国 NASA 的 Lewis 研究中心的 C. L. Kory 所在的研究小组所做的工作为例, 他们使用 MAFIA 软件对螺旋线慢波结构^[2-3]和耦合腔慢波结构^[4]都进行了冷测特性的模拟, 得到的模拟计算结果与硬件冷测实验结果一致。国内也有学者做了类似的研究^[5-7]。利用模拟软件对慢波结构进行精确地建模和分析, 提高了解析模型的计算精度, 缩短了开发周期。然而, 仿真软件本身仍然不可避免地存在局限性, 事实上, 大部分软件仿真都需要消耗大量的时间。目前也取得了一些进展, 欧洲空间技术研究中心的 Aloisio^[8-9]等人将具有 3 根螺旋线慢波结构的冷测模型空间长度减少了 2/3, 并且说明了其方法的正确性。本文验证了 Aloisio 方法的可行性, 着重考虑了该方法在计算时间上的优势, 并且从收敛误差以及计算时所占用的内存资源等方面全面考查了该方法的优点。

1 螺旋线慢波结构周期特性分析

合理利用螺旋线慢波结构特有的角向周期特性可以大大缩减其电磁特性的求解周期。在圆柱坐标系中, 螺旋线在轴向 z 方向具有周期性, 同时在 θ 方向也不均匀, 因此场既要在轴向展开, 也要在 θ 方向展开。螺旋线在轴向移动 1 个螺距 p 的距离, 则它与原螺旋线完全重合。根据 Floquet 定理, 场将仅差一个复常数, 故电场或磁场的任意一个场分量为^[10]

$$A = \exp[j(\omega t - \beta_0 z)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{nm}(r) \exp[-j(2\pi n z/p - m\psi)] \quad (1)$$

式中: β_0 为基波的相位常数; n, m 分别表示沿 z 方向与 θ 方向展开的谐波号数; ψ 表示初始相位参数。对于螺旋线而言, 它的独特之处在于还具有螺旋对称性。如果螺旋线沿轴向 z 移动的距离 $l < p$, 那么, 只要同时将螺旋线旋转 $2\pi l/p$ 角度(假设坐标旋转的方向(即 θ 的正向)与螺旋线旋转方向相同), 就能使运动后的螺旋线与原来的位置完全重合。场在点 (ρ, θ, z) 处由方程(1)描述, 旋转后在点 $(\rho, \theta + 2\pi l/p, z + l)$ 的场为

$$A = \exp\{j[\omega t - \beta_0(z + l)]\} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{nm}(r) \exp\{-j[\frac{2\pi n}{p}z - m\psi + \frac{2\pi l}{p}(n - m)]\} \quad (2)$$

由于结构具有上述的螺旋对称的特点, 点 (ρ, θ, z) 的场结构形式应该与点 $(\rho, \theta + 2\pi l/p, z + l)$ 的场结构形式相同, 也就是说任意长度 l 都可以被认为是一个空间周期。但是在上面的分析中没有考虑夹持杆的影响, 而实际上夹持杆对螺旋线慢波结构中场分布的影响是非常大的。

* 收稿日期: 2007-02-07; 修订日期: 2007-10-31

基金项目: 大功率微波电真空器件技术国家重点实验室基金资助课题(51440020104ZK1301)

作者简介: 唐康淞(1981—), 男, 湖南邵阳, 博士研究生, 主要从事空间行波管的研究; tangkangsong@yahoo.com.cn.

式中: C_0 为非对称系数, 当它的值从 -1 变化到 $+1$ 时, 能量转换区的终端磁场值 ($z = z_2$) 可以从 $-B_0$ 变化到 B_0 , B_0 表示谐振腔区 ($z \leq z_1$) 的磁感强度。本文通过变化 C_0 来优化磁场, 从中找出最佳的磁场形状。

1.3 磁场的计算

回旋波整流器中的沿轴磁场是用分段函数表示, 它的优点是可以很方便地控制磁场的变化, 为优化磁场带来方便, 缺点是在 z_1 和 z_2 点, 它的高阶导数不存在。求空间磁场时, 在分段点处, 磁场会有一个跳变, 显然这是不合理的。本文对沿轴磁场进行了处理, 利用理想线圈的组合来拟合磁场^[3]。先将式(3)离散, 然后用6个理想线圈拟合处理, 拟合公式可以表示为

$$B_0(z, 0) = \sum_{i=1}^6 a_{i1} a_{i2}^3 / [a_{i2}^2 + (z - a_{i3})^2]^{1.5} \quad (4)$$

式中: a_{i1}, a_{i2}, a_{i3} 分别对应于第 i 个理想线圈的磁场幅值, 线圈半径和线圈平面的 z 坐标。有了轴线上的拟合值就可以利用谢尔兹公式来求空间的磁场^[4]。谢尔兹公式为

$$\begin{cases} B_r(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} (r/2)^{2n+1} B_0^{2n+1}(z) / n!(n+1)! \\ B_z(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (r/2)^{2n} B_0^{2n}(z) / (n!)^2 \end{cases} \quad (5)$$

1.4 空间电荷力的计算

由于在能量转换区电子注是3维的, 给空间电荷力的计算带来了困难。在这里用电流杆模型来计算库仑力^[5], 此模型把电流分成许多细的电子束, 在一个很小的空间内, 可以把每个电子束看成一个直线电杆, 上面线电荷均匀分布。利用这个模型可以算出空间电荷力的表达式为

$$\begin{cases} E_{xi} = (-1/2\pi\epsilon_0) \sum_{k=1}^N |\sigma_k| [W_{1k}(x_i - x_k) - W_{2k}(y_i - y_k)] / (R_{ik}^2 + \delta_{r0}^2) \\ E_{yi} = (-1/2\pi\epsilon_0) \sum_{k=1}^N |\sigma_k| [W_{3k}(y_i - y_k) - W_{2k}(x_i - x_k)] / (R_{ik}^2 + \delta_{r0}^2) \\ E_{zi} = (-1/2\pi\epsilon_0) \sum_{k=1}^N |\sigma_k| [W_{4k}(y_i - y_k) - W_{5k}(x_i - x_k)] / (R_{ik}^2 + \delta_{r0}^2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: ϵ_0 是真空介电常数; σ_k 是线电荷密度; $R_{ik}^2 = W_{1k}(x_i - x_k)^2 + W_{3k}(y_i - y_k)^2 - 2W_{2k}(x_i - x_k)(y_i - y_k)$, $W_{1k} = A_{2k}^2 + A_{1k}^2 A_{4k}^2$, $W_{2k} = A_{1k} A_{2k} (A_{4k}^2 - 1)$, $W_{3k} = A_{1k}^2 + A_{2k}^2 A_{4k}^2$, $W_{4k} = A_{2k} A_{3k} A_{4k}$, $W_{5k} = A_{1k} A_{3k} A_{4k}$, $A_{1k} = y_k / R_k$, $A_{2k} = x_k / R_k$, $A_{3k} = \sqrt{1 - A_{4k}^2}$, $A_{4k} = \cos\varphi_k$, $\sigma_k = I_0 A_{4k} / N v_{zk}$, I_0 是电流, N 是电子束个数, $R_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$, $\tan\varphi_k = v_{\perp k} / v_{zk}$ 。为了避免在 $x_i \rightarrow x_k, y_i \rightarrow y_k$ 时出现奇异点, 引入变量 δ_{r0}^2 , 当 $x_i \rightarrow x_k, y_i \rightarrow y_k$ 时, δ_{r0}^2 取能量转换区入口处电子束之间最小距离的一半, 其它情况取零。

2 数值计算程序设计与验证

2.1 程序设计

为了计算方便, 对方程组(2)做了变换 $d/dt = ddz/dzdt = v_z d/dz$, 由于计算过程中的物理量大小相差悬殊, 为了便于数值计算, 对它们进行了归一化处理。

令 $\bar{v} = v/c, \bar{y} = y\lambda, \bar{z} = z\lambda, t = tc/\lambda, \lambda = \eta/c, \eta$ 为荷质比, c 为真空中的光速。通过上述处理可以得到变换后的方程为

$$\begin{cases} d\bar{v}_x/d\bar{z} = -[(1 - \bar{v}_x^2)E_x - \bar{v}_x \bar{v}_y E_y - \bar{v}_x \bar{v}_z E_z + c\bar{v}_y B_z - c\bar{v}_z B_y] / \gamma \bar{v}_z \\ d\bar{v}_y/d\bar{z} = -[(1 - \bar{v}_y^2)E_y - \bar{v}_x \bar{v}_y E_x - \bar{v}_y \bar{v}_z E_z + c\bar{v}_z B_x - c\bar{v}_x B_z] / \gamma \bar{v}_z \\ d\bar{v}_z/d\bar{z} = -[(1 - \bar{v}_z^2)E_z - \bar{v}_x \bar{v}_z E_x - \bar{v}_y \bar{v}_z E_y + c\bar{v}_x B_y - c\bar{v}_y B_x] / \gamma \bar{v}_z \\ d\bar{x}/d\bar{z} = \bar{v}_x / \bar{v}_z \\ d\bar{y}/d\bar{z} = \bar{v}_y / \bar{v}_z \\ d\bar{t}/d\bar{z} = 1 / \bar{v}_z \lambda^2 \end{cases} \quad (7)$$

本文用精度较高的四阶龙格-库塔法对方程组(7)进行求解^[6-7]。

2.2 典型计算结果与全电磁粒子模拟仿真的比较

为了观察电子的横向能量转换为纵向能量的状况,定义能量的转换效率为 $\eta_{\text{rev}} = (\gamma_z - \gamma_{z0}) / (\gamma_{\perp 0} - 1)$, γ_z 和 γ_{z0} 是只考虑纵向能量时的出口和入口的相对论因子, $\gamma_{\perp 0}$ 是只考虑横向能量时入口的相对论因子。当不考虑相对论时可以简化为: $\eta_{\text{rev}} = (\bar{v}_z^2 - \bar{v}_{z0}^2) / \bar{v}_{0\perp}^2$, \bar{v}_{z0} 和 \bar{v}_z 分别是能量转换区入口处和出口处的电子的平均轴向速度, $\bar{v}_{0\perp}$ 是能量转换区入口处电子的平均横向速度。为了验证程序,这里把数值计算的结果和软件 Magic 计算的结果进行了比较。图 1 是电子能量转换效率图,并把数值计算与仿真的结果进行比较。图 2 是仿真模型得到的电子的空间分布。图 3 给出了在能量转换区中单个电子在某一时刻的空间分布,通过和 Magic 仿真时的电子的空间(图 2)分布比较可以看出,两者的分布还是吻合的。

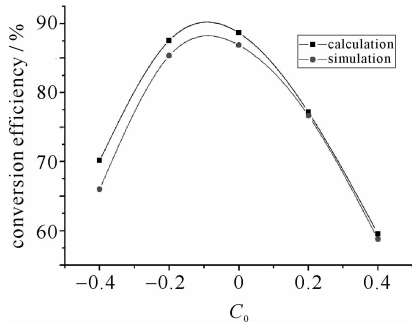


Fig. 1 Conversion efficiency of electron energy

图 1 电子能量转换效率

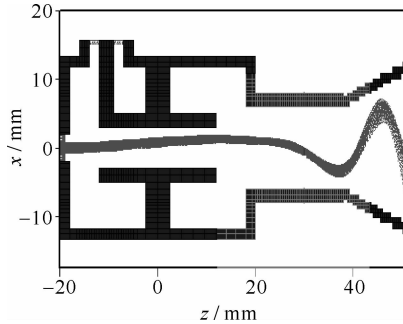


Fig. 2 Electron phasespace of simulation model

图 2 仿真模型得到的电子的空间分布

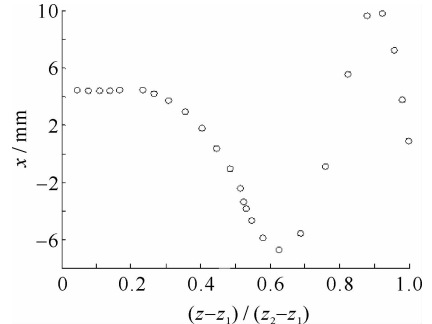


Fig. 3 Electron phasespace by calculation

图 3 数值计算得到的电子的空间分布

3 影响转换效率的因素

在能量转换区中电子的横向能量转换为纵向能量主要依赖于径向磁场,由于在能量转换区中,径向磁场随空间位置的不同而不同。影响径向磁场的因素除了系数 C_0 以外,还和转换区的长度有关。另外电子本身的空间位置以及库仑力也会对转换效率产生影响。电子的空间位置跟电子注半径及初始的横向能量有关。所以我们对这些问题进行了数值计算研究。

3.1 电子注半径的影响

为了观察电子注半径对能量转换效率的影响,定义 $R = r_0 / R_0$, r_0 为电子注半径, R_0 为能量转换区入口处的回旋半径。这里在保持其它电子注的参数不变的情况下,只改变电子注的半径。得到的数值计算结果如图 4(a)所示。从图 4(a)中可以看出,电子注的半径越小,转换效率越高。另外, C_0 越小,电子注的半径对转换效率的影响越大。而在 C_0 大于零的时候,半径的影响几乎可以忽略。

3.2 初始能量比的影响

能量转换区入口的能量比对转换效率的影响通过 W 来观察,其定义 $W = P_{\text{tra}} / P_{\text{lon}}$, 其中 P_{tra} 和 P_{lon} 分别为转换区入口处的横向和纵向能量。图 4(b)列出了数值计算的结果。图 4(b)表明当 C_0 大于某个值(图 4(b)中这个值位于 $-0.2 \sim -0.1$ 之间)时,随着能量比的增加,能量的转换效率减小,但是当 C_0 小于这个值时,恰好相反。并且能量比在比较大的时候,能量转换效率的最大值向左偏移(C_0 减小的方向)。

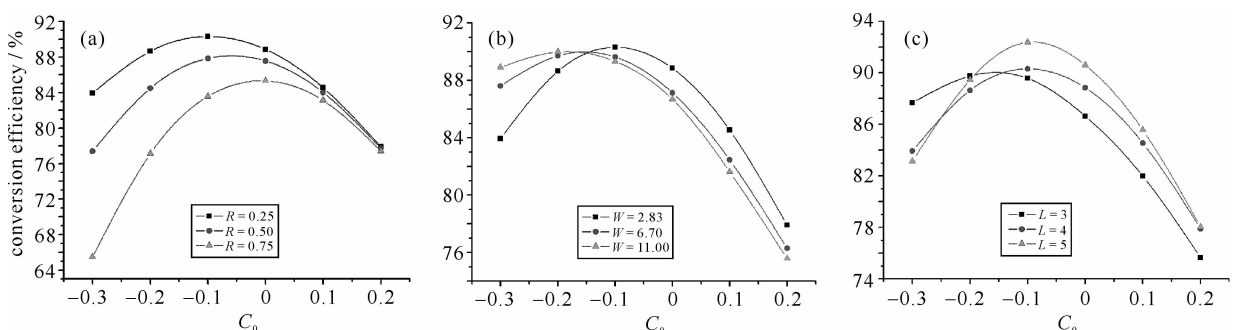


Fig. 4 Relationships between conversion efficiency and beam radius, initial energy ratio, and length of conversion region

图 4 转换效率与电子注半径、初始能量比、转换区长度的关系

3.3 转换区长度的影响

在这里定义 $L = (L_{\text{rev}} \omega_c) / 2\pi v_{z0}$ 来观察长度的影响, L_{rev} 是能量转换区的长度, ω_c 是回旋角频率, v_{z0} 是转换区入口处的纵向速度。图 4(c) 是数值计算的结果。从图中可以看出, 就转换区的最大的转换效率来说, 加大转换区的长度可以使效率得到增加; 但当长度增加到一定的长度以后, 效率基本上保持不变。

3.4 系数的影响

系数 C_0 反映的是磁场的变化的剧烈程度以及磁场的最后数值(即 z_2 点)。通过观察系数 C_0 的影响, 可以对能量转换区中的电子的能量转换有清晰的了解(数值计算结果分别对入口处的电子的回旋半径、纵向能量和横向能量进行了归一化)。

从图 5(a) 可以看出, 随着电子在能量转换区的不断运动, 电子的平均回旋半径越来越大。另外电子的回旋半径随着 C_0 的减小而增加。因为电子的径向空间大, 而轴向磁场的大小和方向都存在着剧烈的变化, 是典型的非旁轴问题。图 5(b) 和图 5(c) 分别反映的是电子纵向能量和横向能量的变化, 但是能量的变化又有所不同。当能量转换区的终端(z_2 点) 磁场值大于零时(即 $C_0 = 0.2, 0$), 电子的横向能量(纵向能量)不断减小(增加), 能量转换区的终端(z_2 点) 就是转换效率最大的点。当能量转换区的终端(z_2 点) 磁场值小于零时(即 $C_0 = -0.3$), 电子的横向能量(纵向能量)并不是不断的减小(增加), 而是在运动过程中还有一个增加(减小)的过程, 所以在能量转换区的终端(z_2 点) 并不是最佳的效率。并且 C_0 越小, 能量的变化越剧烈。

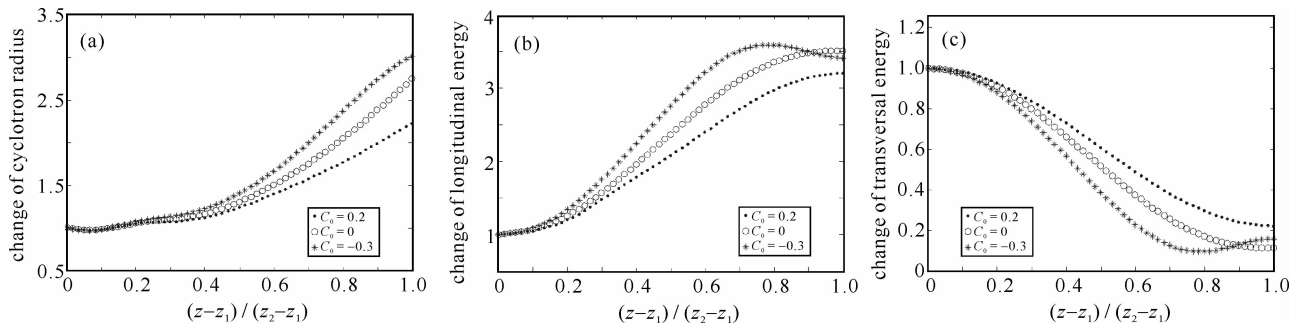


Fig. 5 Influence of coefficient on cyclotron radius, longitudinal energy and transversal energy

图 5 系数对回旋半径、纵向能量和横向能量的影响

3.5 电流大小的影响

电流大小的影响主要体现在库仑力上。在这里使用电流杆模型来计算库仑力。通过计算发现, 电流的大小对能量转换效率的影响很小, 主要是使能量转换区出口处的电子的纵向速度的离散加大。电子的纵向速度的离散会对收集极中电子的回收产生影响。在这里定义 $\eta_c = (v_{z\text{min}}^2 - v_{z0}^2) / v_{0\perp}^2$, 考虑的是在单级收集极没有电子回流的情况下, 横向能量转换为纵向能量的那部分能量中所能回收的最大能量^[4]。 $I_B = B_B^2 r_b^2 V^{0.5} / (6.9 \times 10^{-7})$, 这里 I_B 代表布里渊电流, B_B 是布里渊磁场, r_b 是电子注半径, V 是电子注电压。图 6 是在 $R = 0.25$, $W = 2.83$, $L = 4$, $V = 5.13$ kV, $C_0 = -0.15$ 的情况下数值计算的结果。从图中可以看出, 当电流为布里渊电流的 $2/5 \sim 3/5$ 时, 效率最高, 当达到 $4/5$ 时, 转换效率开始下降。

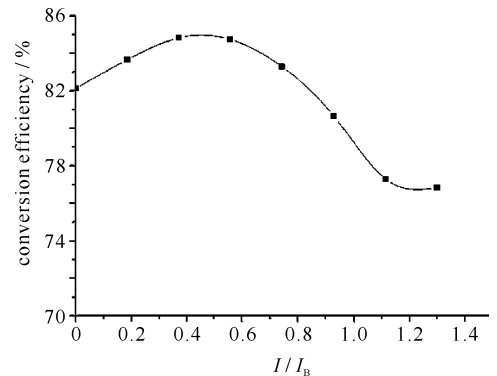


Fig. 6 Influence of current on conversion efficiency

图 6 电流对转换效率的影响

4 结 论

本文分析了回旋波整流器能量转换区的特点, 编制了相应的计算程序, 典型情况下程序计算结果与全电磁粒子模拟仿真一致, 可大大节省机时, 利用此程序对倒向区磁场分布、电子注大小、电流大小、入口电子注的速度比对能量转换效率的影响进行了大量的计算与分析, 通过计算与分析发现, 这些参数选择合适, 不仅可以使横向能量最大程度的转换为纵向能量。也可以为收集极提供理想的电子参数, 提高收集极的效率, 从而使整管的效率得到提高。

参考文献:

- [1] 王秩雄, 李强, 乔斌. 快回旋电子束微波整流器及其应用[J]. 空间电子技术, 2005, (2):57-64. (Wang Z X, Li Q, Qiao B. Microwave rectifier based on fast cyclotron electron beam wave and its application. *Space Electronic Technology*, 2005, (2):57-64)
- [2] Vanke V A, Matsumoto H, Shinohara N, et al. Cyclotron wave converter of microwaves into DC[J]. *IEICE Trans on Electronics*, 1998, **81**:1136-1142.
- [3] 李家胤. 回旋管磁场计算方法的研究[J]. 成都电讯工程学院学报, 1984, (3):33-48. (Li J Y. An investigation of the calculation method of the magnetic field for gyrotron. *Journal of the Chengdu Institute of Radio Engineering*, 1984, (3):33-48)
- [4] 赵国骏. 电子光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (Zhao G J. *Electron optics*. Beijing: National Defence Industry Press, 1985)
- [5] Vanke V A. Transverse electron-beam waves for microwave electronics[J]. *Physics-Uspekhi*, 2005, **48**(9):917-937.
- [6] 王华军, 李宏福, 石红. 回旋管单阳电子枪计算机辅助设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(11):1123-1126. (Wang H J, Li H F, Shi H. Computer assistant design of a signal anode electronic gun for gyrotron. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11):1123-1126)
- [7] 李家胤, 周晓岚, 程念安. 相对论冷阴极二极管的数值模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 1994, **6**(1):32-37. (Li J Y, Zhou X L, Cheng N A. Numerical simulation analysis of a relativistic code cathode diode. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, **6**(1):32-37)

Numerical calculation of conversion region in cyclotron wave converter

SUN Zhi-guo, LI Jia-yin, ZHAO Xiao-yun

(*High Power Radiation Key Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract: The motion of the electron in the conversion region has been analysed. The equations of the electron motion are given and calculated. The effects of the beam radius, the initial energy ratio, the length of the conversion region and the magnetic field are taken into account in the numerical simulation. When the ratio of the beam radius to the cyclotron radius is 0.25, the ratio of the transversal energy to the longitudinal energy is 2.83, the unitary length is 3 and the nonlinearity coefficient is -0.1 , and the conversion efficiency can reach 90%.

Key words: High power microwave; Cyclotron wave converter; Conversion region; Reversed magnetic field; Numerical calculation