

2.85GHz回旋波整流器高频系统的设计及优化

徐子枫, 李天明, 刘坤

电子科技大学物理电子学院 国家 863 计划强辐射实验室, 成都 610054

摘要: 对2.85GHz回旋波整流器的高频相互作用区进行了研究与设计; 运用CST分析了高频结构中耦合环结构的变化对高频系统S参数的影响, 在此基础上对腔体结构做了优化; 并用CST PIC对其进行了粒子模拟。最后设计出了工作在2.85GHz, 具有较高能量转化效率的回旋波整流器高频相互作用区。

关键词: 无线输电, 回旋波整流器, 高频系统

1 引言

近年来, 随着人们生活水平的不断提高和探索物质世界的逐渐深入, 人们对电能的传输方式和传输质量也有了新的要求, 传统的电能传输主要是由导线或导体直接接触进行的, 接触产生的火花、滑动磨损、碳积累及带电导体裸露等带来了一系列问题。无线输电是一种利用无线电传输电力能量的技术, 最早由尼古拉特斯拉提出, 与传统的电能传输方式相比, 无线输电的过程中供电和用电之间不存在电的直接连接, 避免了裸露导体和接触火花, 具有使用安全、方便等优点, 因而受到了广大研究工作者的关注和重视。无线输电技术应用领域非常广泛, 特别是在军事、矿山、水下、医疗、石油、交通等特殊和恶劣环境下具有广泛的应用前景。此外, 无线输电作为建造卫星太阳能电站关键性技术环节, 能源源不断的将太阳能转化成电能传输到地球供人类使用, 可极大缓解当前能源紧张的状况。

2 回旋波整流器

回旋波整流器 (cyclotron-wave rectifier) 又被称为回旋波微波功率转换器 (cyclotron-wave microwave power converter) 或回旋波微波—直流转换器 (cyclotron-wave converter of microwave into DC), 是一种特殊的真空电子器件, 其结构原理如图 1 所示。

回旋波整流器主要由电子枪、Cuccia 谐振腔、转换区、收集极组成, 管内保持高真空, 管外有如图 1 所示的中间倒向轴向磁场。当微波功率通过能量耦合结构注入进谐振腔后, 在腔的两脊之间会产生相当强的横向高频电场; 一束由电子枪发出的笔形电子束以一初始纵向速度进入到两

脊之间的间隙后, 受到横向微波电场与轴向磁场的共同作用, 当电子在磁场中的回旋角频率 ω_c 等于微波角频率 ω 时, 电子受到回旋共振加速, 横向能量不断增加, 回旋半径不断增大, 直至获得需要的能量后飞出横向场区。然后, 该绕轴做大回旋运动的电子注进入倒向磁场区, 在正则角动量守恒与能量守恒规律的支配下, 大部分横向回旋动能转变为轴向动能, 以相当高的轴向速度进入收集极。收集极区内的电子受到轴向减速场的作用, 动能转变为供给负载的电能, 并以较低的速度打在收集极上, 实现了电子动能到直流电的转换。

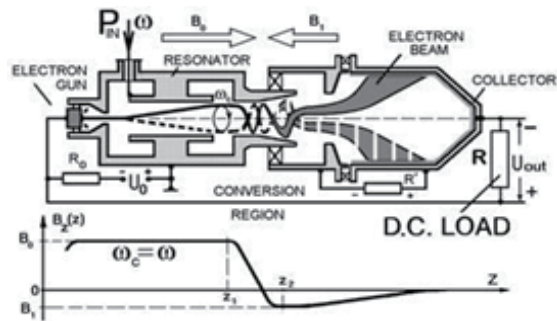


图 1 回旋波整流器结构原理图

3 高频系统设计

Cuccia 耦合腔是回旋波整流器高频相互作用区的核心器件, 它的结构如图 2 所示, 它采用的圆柱形谐振腔, 其内部有两个极板, 为了支撑极板, 极板与谐振腔的连接称为脊。Cuccia 耦合腔的作用是使微波能量进入腔内, 并在两个极板之间形成高频电场。如果设计得合理, 微波能量能够高效地进入耦合腔, 并且电场基本上集中在两个极板之间。

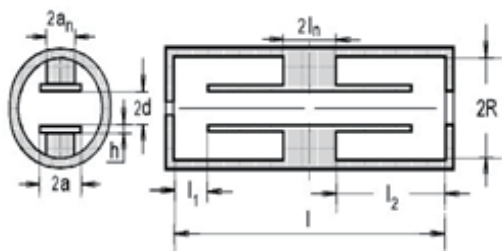


图2 Cuccia 耦合腔结构图

为了使注波相互作用充分，我们通过谐振腔的谐振频率来确定谐振腔的尺寸参数。通过对 Cuccia 谐振腔结构的电路简化，如图 3 所示，即可以求出该等效电路的谐振频率为：

$$\omega_0^2 = \frac{C_\Sigma (L_c + 2L_n) + C_c L_c - \sqrt{[C_\Sigma (L_c + 2L_n) + C_c L_c]^2 - 8C_\Sigma C_c L_n}}{4C_\Sigma C_c L_n}$$

其中 C_Σ 为谐振腔内两极板间的总电容，它与两个极板的面积和间距有关， L_n 为连接极板和谐振腔的脊的电感，它与脊的长、宽以及圆柱谐振腔的外径有关， L_c 为工作于 H111 模的圆柱谐振腔的等效电感， C_c 为工作于 H111 模的圆柱形谐振腔的等效电容。

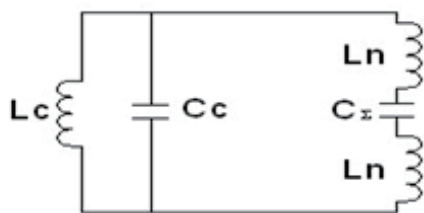


图3 回旋波整流器等效简化电路

4 仿真

在圆柱谐振腔中应合理的安置耦合环，尽可能使同轴线与谐振腔匹配，减少信号的反射，使输入信号较为充分地利用。

利用 CST，通过调整同轴线的长度、同轴中心到谐振腔中心的距离以及内外导体的半径来优化同轴端口的 S11 参数，变化结果如图所示：

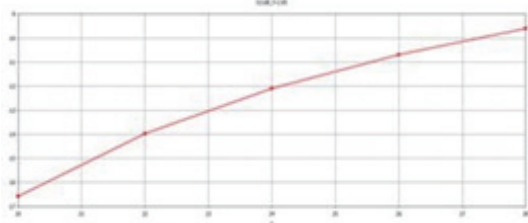


图4 同轴线长度对 S 参数的影响

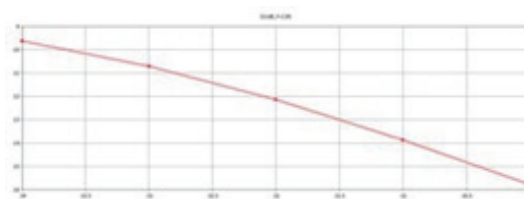


图5 同轴与谐振腔中心间距对 S 参数的影响

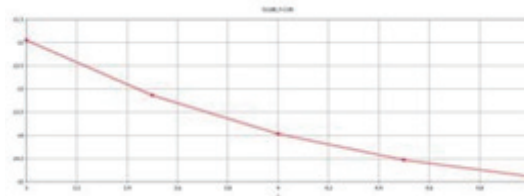


图6 内外导体半径对 S 参数的影响

如图 4,5,6 所示，调整同轴线的长度、同轴中心到谐振腔中心的距离、同轴中心到谐振腔中心的距离以及内外导体的半径均对高频系统的 S 参数有较大的影响。同轴线的长度与高频系统的 S 参数呈正增长，但在实际设计中要考虑 1/4 波长的影响以及同轴接口的连接性问题，因此长度不能无限小；同轴中心到谐振腔中心的距离对应 S 参数的变化也呈正增长，因此尽量选取一个靠近谐振腔中心的点；内外导体半径比增大，高频系统的 S 参数相应减小，再考虑到内外导体半径比对同轴线最大传输功率的影响，选定一个合适的值。

表 1 2.85GHz 回旋波整流器高频结构设计参数

参数名称	参数值
电容板宽度 a/mm	12
电容板间距 d/mm	12
电容板长度 L/mm	74.5
电容板厚度 h/mm	2
谐振腔长度 l/mm	91.5
谐振腔半径 R/mm	17
脊长 2ln/mm	46.8
脊宽 2an/mm	12
工作频率 f0/GHz	2.814
同轴线长度 mm	14
同轴线中心到谐振腔中心的距离 mm	30.25
同轴线内半径 mm	1
同轴线外半径 mm	4

最后，经过优化设计，得出了符合条件的谐振腔的各个参数。

为了进一步验证注波相互作用的效率，通过 CST PIC 仿真得到结果如图 7 所示。仿真是在 2.85GHz，输入微