

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.014

## W 波段 VLASOV 准光模式变换器的优化仿真

宋刚永<sup>1,2</sup>, 聂开俊<sup>1</sup>, 李思政<sup>2</sup>

(1. 淮安信息职业技术学院 电子工程系, 江苏 淮安 223003;

2. 江苏省电子产品装配制造工程技术研究开发中心, 江苏 淮安 223003)

**摘要:** 针对传统天线受到高功率微波的输出功率和脉宽限制的问题, 对 W 波段准光模式变换器进行优化仿真。基于准光近似理论, 建立了输入模式为 TE<sub>03</sub> 模、频率为 94 GHz 的阶梯型 VLASOV 准光模式变换器模型, 并进行了仿真优化设计, 得到了优化后的 VLASOV 准光模式变换器数模型参数。仿真结果表明: 辐射波束具有明显的方向性, 波束明显变窄锐化, 主瓣增益很高, 达到 29.46 dBi, 能量主要集中在主瓣上, 旁瓣增益较低, 辐射效率达到 87.36%。

**关键词:** 高功率微波; W 波段; VLASOV 准光模式变换器; 优化仿真

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Simulation of W-Waveband VLASOV Quasi-Optical Mode Converter

Song Gangyong<sup>1,2</sup>, Nie Kaijun<sup>1</sup>, Li Sizheng<sup>2</sup>

(1. Dept. of Electronic Engineering, Huaian College of Information Technology, Huaian 223003, China;

2. Jiangsu R&D Center for Electronic Product Assembly Manufacture Engineering Technology, Huaian 223003, China)

**Abstract:** In view of impulsion duration shortens when classical antennas transmits high power microwave, quasi-optical mode converter is optimized and simulated. On the basis of the quasi-optical theory, VLASOV mode converter which has input mode TE<sub>03</sub> and frequency 94GHz is subject investigated. Model parameters of mode converter are obtained using optimization design. The result shows that radiation wave beam is directional and sharpens obviously. Main lobe gain is up to 29.46dBi, output power centered in main lobe, side lobe gain become lower, radiation power efficiency is 87.36%.

**Keywords:** high power microwave; W-waveband; VLASOV quasi-optical mode converter; optimization simulation

### 0 引言

在从微波源向自由空间的转换过程中, 高功率微波输出模式采用圆波导的轴对称模式, 这类模式自身没有确定的极化方向, 辐射方向在其轴线也呈现出理想的空心圆锥状。这样的模式若直接激励传统天线作为输出, 将会有能量分散, 旁瓣电平高, 增益低等问题<sup>[1-3]</sup>。回旋管外接模式转换器也称为 VLASOV 模式变换器, 是俄罗斯科学家 VLASOV 于 1974 年首先提出的<sup>[4]</sup>, 这种变换器的优点在于可以直接将圆极化的 TE<sub>0n</sub> 模转换为线极化的准高斯波束向空间辐射出去, 经过天线抛物柱面能进一步提高天线的增益。相对于波导模式变换器而言, 准光模式变换器具有结构简单, 易于加工实现, 功率容量高等特点, 并且辐射波束的方向也容易调节。故通过建立 VLASOV 准光模式变换器模型, 用微波仿真软件进行优化分析, 对 VLASOV 准光模式变换器的参数进行优化, 以改善模式变换器的方向图特性, 分析获取较理想的参数模型, 为后续研究工作提供参考。

### 1 VLASOV 准光模式变换器建模

准光模式变换器的模型分析可以用准光学理论来说明<sup>[5-7]</sup>。笔者采用阶梯型开口的准光模式变换器模型, 如图 1。对于圆波导中的 TE<sub>0n</sub> 模式, 其纵向磁场为:

$$H_z(r, z) = J_0(k_n r) e^{-i\beta_n z} \quad (1)$$

$$H_z(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-ik_n r} \cdot e^{-i\beta_n z} d\theta \quad (2)$$

$$\Lambda = \sin^{-1} \left( \frac{k_n}{k} \right) \quad (3)$$

式中,  $J_0$  为 Bessel 函数,  $k_n = \mu_n / a$ ,  $\mu_n$  是  $J'_\mu(X)$  的第  $n$  个零点,  $a$  是圆波导的半径。  $\beta_n = \sqrt{k^2 - k_n^2}$ , 其中,  $k$  为自由空间的波数,  $k = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  为真空中的波长,  $\theta$  为  $k_n$  与  $r$  之间的夹角, 式 (2) 是由式 (1) 写出的 Bessel 函数积分表达式,  $\Lambda$  是圆波导中的 TE<sub>0n</sub> 模式被看作由一系列的平面波叠加而成时, 平面波与圆波导轴之间的夹角。

收稿日期: 2010-04-02; 修回日期: 2010-05-24

基金项目: 江苏省电子产品装配制造工程技术研究开发中心资助课题 (HAG09057)

作者简介: 宋刚永 (1980-), 男, 江苏人, 硕士, 助理讲师, 从事高功率微波器件、微波通信研究。

以微波仿真软件为平台，设计了中心频率为 94 GHz 输入模式为 TE<sub>03</sub> 模的准光模式变换器，由于采用的是阶梯型切口的模型，设计过程中还需要考虑以下 4 个参数<sup>[8]</sup>：模式变换器的波导直径、阶梯型切口的长度、抛物面反射面的长度以及抛物面反射面的宽度。优化仿真后的准光模式变换器结构尺寸如表 1。由表 1 可以得到准光模式变化器数值模拟模型如图 2。

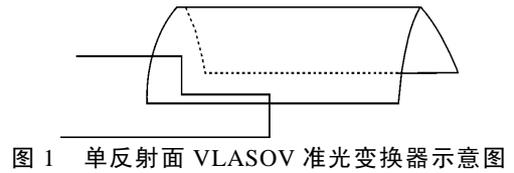


图 1 单反射面 VLASOV 准光变换器示意图



图 2 VLASOV 模式变换器模型

表 1 VLASOV 准光模式变换器参数

paraboloid focal length <i>f</i> /mm	waveguide diameter <i>d</i> /mm	step cut length <i>l</i> /mm	paraboloid width <i>w</i> /mm	paraboloid length <i>l</i> /mm
10	9	10	25	40

## 2 优化仿真结果与分析

### 2.1 输入端口的波导模式

当在圆波导端口激励 94 GHz 的 TE<sub>03</sub> 模式时，模式变换器输入端口的波导模式如图 3，可以看出，输入端的模式是标准的圆极化模，TE<sub>03</sub> 模式作为激励模式，是经典的微波输入源。准光模式变换器作为回旋管的外接模式变换器，尺寸因当尽可能小，对不同的模式而言，波导的半径越小，波的模式越高，所需要的抛物柱面也就越短。选择 TE<sub>03</sub> 模式作为输入模式，能有效地减短抛物柱面的长度，从而使变换器具有较小的几何尺寸。

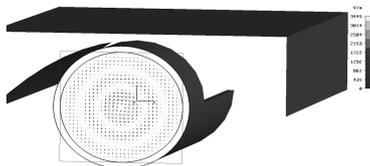


图 3 VLASOV 准光模式变换器端口输入模式图

输入端口中圆极化的 TE<sub>03</sub> 模式，通过准光模式变换器转化为线极化的准高斯模，并通过抛物柱面辐射出去。由于有抛物柱面反射面的作用，从图 4 可以看出，辐射具有了明显的方向性，并且在某一个方向上波束变窄。

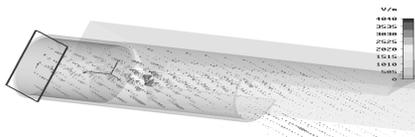


图 4 VLASOV 准光模式变换器辐射图

定义入射的 TE<sub>03</sub> 模式的传输方向为 Z 轴的负方向，结果表明输入的 TE<sub>03</sub> 模式通过准光变换器后，辐射的方向与 TE<sub>03</sub> 模式的传播方向(Z 轴的负方向)成大约 30° 的夹角。与由准光近似理论推导出的式

(3) 的计算结果基本吻合。

### 2.2 传输效率

图 5 为准光变换器传输参数，以总功率 100% 计算，在中心频率为 94 GHz 时，由输入模式 TE<sub>03</sub> 模式，可得到转换为准高斯模的传输值为 0.934 7，则其功率转换效率为 87.36%。

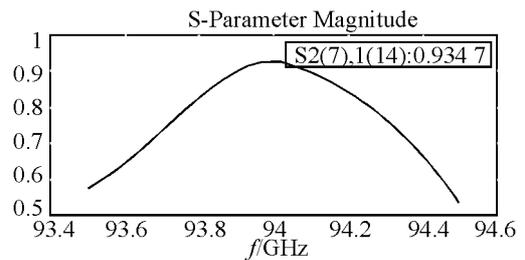


图 5 VLASOV 准光模式变换器 S21 传输的幅值

如图 6，在端口处 TE<sub>03</sub> 模式呈现空心圆锥状的辐射功率。在通过准光模式变换器时，辐射的功率不再是空心圆锥状，而是以最大辐射强度出现在波导的轴线上，并且辐射功率具有了明显的方向性，便于长距离的传输。TE<sub>03</sub> 模式至少存在 3 个旁瓣，并且辐射功率的最大方向不在波导的轴线上，而是偏离波导轴线成一定的夹角，呈空心圆锥状。这种辐射效率很低，不便于长距离的传输，通过该准光模式变换器时，这一情况将得到很好的改善。

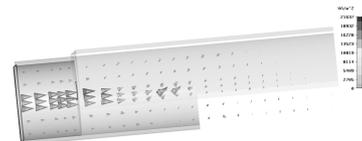


图 6 VLASOV 准光变换器功率分布图

### 2.3 增益

图 7 为准光变换器三维方向图，TE<sub>03</sub> 模式作为输入模式，在辐射图上有 3 个旁瓣，旁瓣增益较

低, 能量主要集中在主瓣上, 主瓣增益高, 达到 29.46 dBi, 并且辐射波明显锐化。其转化效率达到 87.36%。

该准光变换器理论增益大约为 35 dBi, 该理论值与模拟的结果存在一定的误差, 理论计算出的增益要比模拟计算的增益高。究其原因: 频率 94 GHz 时,  $TE_{03}$  模式是经典的微波输入源, 波导中将出现多重模式, 必须抑制除主模  $TE_{03}$  模以外的其他模式出现。虽然主瓣仅包含了主模的能量, 其他模式没有贡献, 但由于包含了其他模式使主模所占比例变小, 从而造成了能量损失。进行理论计算时, 考虑的是单一模式, 在仿真计算过程中, 不可避免地引入一些其他模式, 导致仿真计算出的准光模式变换器的增益要比准光近似理论计算出的增益低。

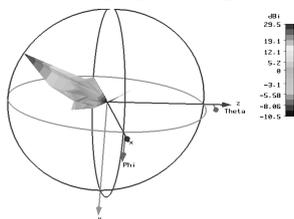


图 7 VLASOV 准光变换器三维方向图

## 2.4 功率容量

准光模式变换器应用于高功率微波传输场合, 考虑到附近高电场的击穿问题。根据大量结构击穿的试验研究表明在真空中的击穿场强为 45 kV/mm~250 kV/mm, 通常取值为 100 kV/mm<sup>[9]</sup>。对自由空间中的平面波而言, 功率密度和电场之间的关系是<sup>[10]</sup>:

$$P = \frac{1}{2\eta} |E_{\max}|^2 \quad (4)$$

其中,  $P$  为电场的功率容量,  $\eta$  为自由空间波阻抗 (377  $\Omega$ ),  $E_{\max}$  为电场峰值强度。

采用电磁仿真估算中心频率为 94 GHz、输入模式为  $TE_{03}$  模的准光模式变换器的功率容量, 得到功率为 10 W 时电场分布如图 8。设计的输入功率的初值功率  $P_0=10$  W, 仿真计算得到的电磁场的最大值  $E_{\max}$  为 17.33 kV/m, 取真空中的场强  $E_0$  为 100 kV/mm, 设该模式变换器的最大的功率容量为  $P_{\max}$ , 已知电场强度与功率, 再由式 (4) 可得:

$$P_{\max} = (E_{\max} / E_0)^2 P_0 \quad (5)$$

则通过式 (5) 计算出最大功率容量  $P_{\max}$  约为 333.4 MW, 当输入端口波导直径为 9 mm 的准光模式变换器时, 其功率的容量超过了 300 MW, 满足

了现有绝大多数高功率源微波源功率容量要求, 不会产生功率击穿现象。



图 8 VLASOV 准光变换器的电场分布

## 3 结束语

仿真结果表明: 辐射波束具有明显的方向性, 波束明显变窄锐化, 主瓣增益很高, 达到 29.46 dBi, 能量主要集中在主瓣上, 旁瓣增益较低, 辐射效率达到 87.36%, 当输入端口波导直径为 9 mm 的准光模式变换器时, 其功率的容量超过了 300 MW, 满足了现有绝大多数高功率源微波源功率容量要求。

## 参考文献:

- [1] Koslover R A, Koslover R A, Cremer C D, et al. Compact, Broadband high power circular  $TM_{01}$  to  $TE_{11}$  mode converter[P]. U. S. Patent. 4999591.
- [2] Courtney C C, Baum C E. The Coaxial beam rotating antenna (COBRA): Theory of Operation and Measured Performance[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 48(2): 299-309.
- [3] Haworth M, Allen K, Baca G, et al. Recent progress in the hard-tube MILO experiment[A]. SPIE V, 1997, 3158: 28-39.
- [4] VLASOV S N, Orlova I M. Quasi-optical transformer which transformer the waves in a waveguide having a circular cross section into highly directional wave beam[J]. Radio Physics and Quantum Electronics, 1974, 17(1): 148-154.
- [5] Denison D R, Chu T S, Shapiro M A, et al. Gyrotron internal mode converter reflector shaping from measured field intensity[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(2): 512-519.
- [6] Yu Xin-hua, Meng Lin, Niu Xin-jian, et al. Study of complex mode converter for 3mm-wave complex cavity gyrotron[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2009: 219-220.
- [7] Prinz O, Arnold A, Gantenbein G, et al. Highly efficient quasi-optical mode converter for a multifrequency high-power gyrotron[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(5): 828-834.
- [8] Niu Xin-Jian, Yu Sheng, Li Hong-Fu. Corrugated waveguide mode conversion for 94GHz second-harmonic gyrotron[C]. Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 2006: 91.
- [9] 孙会芳, 董志伟. 高效率磁绝缘线振荡器的设计和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 797-801.
- [10] 段耀勇, 陈雨生. 高功率微波脉冲大气击穿及其对能量传输的影响[J]. 微波学报, 2000, 16(3): 261-265.