

文章编号:1000-582X(2005)12-0062-03

Ka波段回旋振荡管准光输出系统 CAD*

许乐^{1,2},牛新建³

(1. 四川师范大学 信息网络中心, 四川 成都 610066; 2. 西南交通大学 CAD 工程中心, 四川 成都 610031;
3. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:基于几何光学理论和矢量绕射理论,研究了将回旋管及其它高功率微波器件的振荡输出模式转换成线极化准光高斯波束的模式变换器,模拟出了准光模式变换的辐射特性,采用 Vlasov 辐射器和准光反射面实现了线极化准高斯模 HE_{11} 横向输出方式。

关键词:Vlasov 辐射器;回旋管;模式变换

中图分类号:TN811; TN814

文献标识码:A

高功率微波器件可产生几百千瓦至几兆千瓦的脉冲功率,其中回旋管具有高峰值功率、高平均功率、高增益、适当带宽等优点,很适合作毫米波高性能雷达、相控阵雷达、受控热核聚变等系统用功率源。目前回旋振荡管领域研究的热点就是采用内置式的准光模式变换器,有 70% 的回旋管采用此种功率输出结构^[1],回旋振荡管直接从横向输出准光高斯波束 TEM_{00} 模。这种内置式的准光模式变换器有以下好处^[2-3]:

1) 可方便地实现波与电子束的分离。电子束收集极不再成为输出波导的一部分,由于波的输出方向在横向,可以自由设计降压收集极形状,提高整管效率。

2) 波的反射被隔离。由于高功率微波通过反射镜从横向输出,反射到谐振腔的电磁波将大为减少,尤其是输出窗略微倾斜,会大大减弱这种反射,从而避免了纵向输出回旋管由于输出端口不均匀性反射回来电磁波而干扰谐振腔中的注波互作用。

3) 输出模式是最佳的线极化高斯波束,可直接用波纹波导或反射镜低损耗传输,或直接利用。当要求紧凑格式变换为 TEM_{00} 模时,准光模式变换器也可用于低过模系统。

为提高电子束收集极的效率,有效抑制收集极电子的散射,提高整管效率,对长脉冲、高功率回旋管输出耦合可采用波与电子束分离的方法——准光模式变换的方法。准光模式变换器主要适用于功率更高,波长更短的高功率毫米波传输,因为波长越短,准光高斯波

束的绕射效应就越弱,并由于采用开敞波导,可以承受很高的功率容量。采用内置准光模式变换器的高频输出结构主要由伏拉索夫辐射器(Vlasov launcher)及多级反射镜构成。伏拉索夫辐射器或伏拉索夫天线的主要作用是将波导输出模式有效地向外空间辐射,且辐射分布呈高斯分布。若回旋管输出为 TE_{0n} 或 TE_{1n} 模,或回旋管输出为角向驻波模式,伏拉索夫辐射器一般采用阶梯形辐射器或斜切形辐射器。若回旋管输出为角向旋转的高阶边廊模式,伏拉索夫辐射器应用螺旋切口形辐射器。而多级反射镜是为输出波束更好的聚束和相位校正,使输出波束呈高斯分布。

1 准光模式变换基本原理

对工作于非对称 TE_{mp} ($m \neq 0$) 模的回旋管,需要将高度边廊化的复杂极化模式转化为线极化适于传输的低阶模式。Vlasov 辐射器即可将旋转的波导模式沿其射线旋转方向展开,如图 1 所示,且其辐射器矩形口径上场幅值沿纵向近似为均匀分布^[4]。

设开放式谐振腔的输出模式为右旋 TE_{mn} 模的圆波导模式,由于波导中心能流是沿螺旋方式进行的,Vlasov 辐射器的螺旋形斜开口是顺着能量方向开口的,其纵向开口长度^[5-7]

$$L = 2\pi a_0 \cdot \frac{\beta}{k_c} \cdot \frac{\mu_{mn}^2 - m^2}{\mu_{mn}}$$

* 收稿日期:2005-07-02

基金项目:国家 863 激光技术领域资助项目(863-410-7);国防重点实验室基金项目(51440040204DZ02)

作者简介:许乐(1978-),女,四川安岳人,四川师范大学讲师,硕士,主要从事高功率微波 CAD 研究。

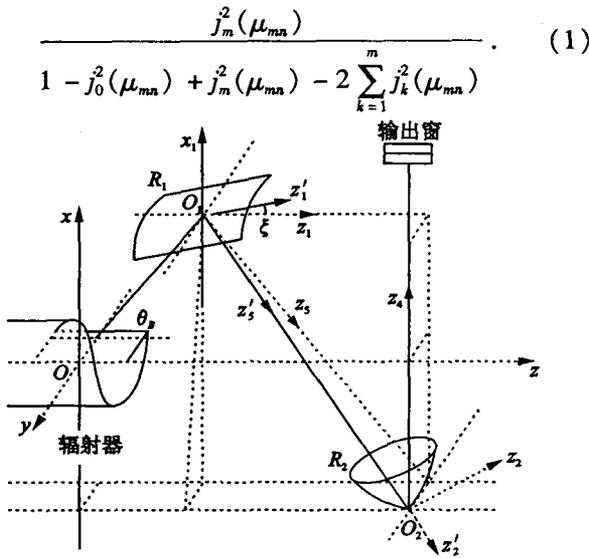


图1 准光模式变换系统

Vlasov辐射器矩形口径的绕射场可由Stratton-Chu公式求解,

$$\left. \begin{aligned} E' &= \iint_S \{ -j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{H})\mathbf{G} + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \nabla\mathbf{G} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \nabla\mathbf{G} \} dS, \\ H' &= \iint_S \{ j\omega\varepsilon(\mathbf{n} \times \mathbf{E})\mathbf{G} + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \times \nabla\mathbf{G} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) \nabla\mathbf{G} \} dS, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\mathbf{G} = \frac{e^{-jk_0R}}{4\pi R}, \quad (3)$$

式(2)-(3)中G为自由空间的格林函数. 考虑到螺旋形切口对所选择的矩形口径会有部分遮挡效应,其面积部分必须减去与辐射器相交所对应的源点. 交点N(x_N, y_N, z_N)可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_N &= x' \frac{y'^2 - yy' + \sqrt{a^2x'^2 + a^2(y' - y)^2 - x'y'^2}}{x'^2 + (y' - y)^2}, \\ y_N &= \frac{y' - y}{x'} x_N + y, \\ z_N &= \frac{z' - z}{x'} x_N + z, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

交点N所对应的圆柱坐标N{a, φ_N, z_N}, Vlasov螺旋形切口的参数方程为

$$\mathbf{r}_1 = \left\{ a\cos\phi, a\sin\phi, \frac{L}{2\pi} \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right) \right\}, \quad (5)$$

与切口对应的φ_N角点M坐标为

$$z_M = \frac{L}{2\pi} \left(\phi_N - \frac{\pi}{2} \right). \quad (6)$$

比较z_M, z_N可判断所对应的源点是否被遮挡. 反射面所产生的辐射场为

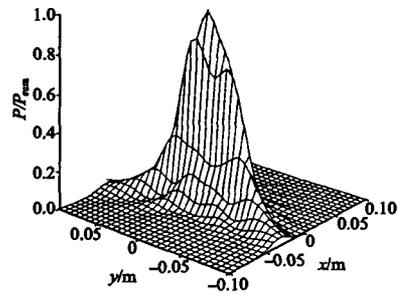
$$\left. \begin{aligned} H_p &= \iint_S \{ (\mathbf{J} \times \nabla\mathbf{G}) dS \}, \\ \mathbf{J}_i &= 2(\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

其中H_i为激励反射面的入射磁场, 反射面的方程为^[6]

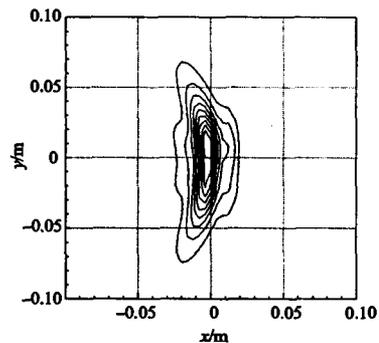
$$y_1^2 = -4f_1x_1. \quad (8)$$

2 准光模式变换的数值模拟

根据上述理论, 采用频率f₀ = 35 GHz、波导半径a₀ = 16 mm的TE₃₂波导输出模式进行优化分析, 其辐射场相对功率分布如图2所示. 由于Vlasov辐射器的辐射主瓣较宽, 波束形状不规则, 有限的反射面只能截获部分能量, 且需多个反射面进行相位校正, 功率转换效率较低. 采用多个反射曲面使得入射波束经R₁校正后在输出窗W处同相, 且各点的入射波束经R₁反射后均到达输出窗W处. 此方法须三级反射来实现理想的高斯分布. 图3(a)表示反射面R₂处的辐射场相对功率二维分布, 图3(b)表示输出窗W处的功率分布, 波形已转换为高斯波束. 其总的功率转换效率η = 90.6%, 其中高斯成分η_G = 96%, 束腰为15 mm × 16 mm. 对Vlasov辐射器来说, 由于其主瓣较宽, 有限的反射面不能截获所有的能量, 因其辐射波形不规则, 需经多级反射对其相位进行校正, 功率转换相对较低.



(a) 三维分布



(等值线从外到内依次为: 0.1, 0.2, ..., 0.9)

(b) 二维等值线分布

图2 准光模式变换器在反射面R₁处的辐射场相对功率分布

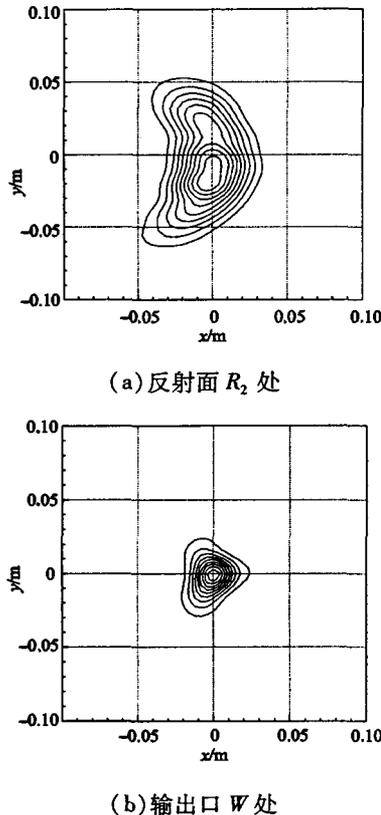


图3 准光模式变换器在反射面 R_2 及输出窗处的辐射场相对功率二维等值线分布

因此,单纯增加反射的级数并不能显著改善功率转换效率,其未曾截获的能量也随反射级数的增加而增加.若应用对反射面分小块调节相位的方法,调整入射波束的相位和方向设计复杂反射曲面,只需一级反射即可得到比较理想的高斯分布^[7-8].

3 结语

常规的波导模式变换主要针对低阶模式的变换,

若对高阶模式变换则结构复杂、效率低、带宽窄.采用 Vlasov 辐射器和准光反射面实现了线极化准高斯模 HE_{11} 横向输出方式.应用对反射面分小块调节相位的方法,调整入射波束的相位和方向设计的复杂反射曲面,只需一级反射即可实现理想的高斯分布.

参考文献:

- [1] DENISON D R, CHU T S, SHAPIRO M A, et al. Gyrotron Internal Mode Converter Reflector Shaping from Measured Field Intensity[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1999, 27(2): 512 - 519.
- [2] MANFRED K THUMM, WALTER KASPAREK. Passive High-power Microwave Components[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2002, 30(3): 755 - 786.
- [3] BOGDASHOV A A, CHIRKOV A V, DENISOV G G. Mirror Synthesis for Gyrotron Quasi-optical Mode Converters[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Wave, 1995, 16(4): 735 - 744.
- [4] HARPER B M, LORBECK J A, VERNON R J. Quasi-optical Internal Mode Converters for 110 GHz Gyrotrons[Z]. International Conference on Plasma Science, San Diego, California, 1995. 240.
- [5] CHRISTOS T IATROU. A Quasi-optical Mode Converter with a Bifocal Mirror[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(3): 529 - 533.
- [6] YANG SHIWEN, SOON HIE TAN, LI HONGFU. A New Method for the Design of a Quasi-optical Mode Converter with a Special Reflector[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(7): 1 849 - 1 852.
- [7] JEFFREY A LORBECK, RONALD J VERNON. A Shaped Reflector High Power Converter for a Whispering-gallery Mode Gyrotron Output[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(12): 1 383 - 1 388.
- [8] 牛新建, 李宏福, 喻胜, 等. 8 mm 高功率过模弯曲圆波导 TE₀₁-TM₁₁ 模式变换[J]. 物理学报, 2002, 51(10): 2 291 - 2 295.

Computer Aided Design for Quasi-optical Output System of Ka Wave Band Gyrotron

XU Le^{1,2}, NIU Xin-jian³

(1. Center of Information Network, Sichuan Normal University of China, Chengdu 610066, China;

2. Center of CAD Engineering, Southwest Jiaotong University of China, Chengdu 610031, China;

3. Institute of High Energy Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the geometrical optics and vector diffraction theory, mode converter is studied the output mode of which is converted to line polarization Gauss beam of gyrotron and high power microwave device, the radiation characteristic of quasi-optical mode conversion is simulated. Quasi gauss mode HE_{11} can be realized with Vlasov launcher and quasi-optical reflector.

Key word: Vlasov launcher; gyrotron; mode conversion