

准光学栅格振荡器阵列的分析与设计*

谢文楷** 张邦术

(电子科技大学高能电子所 成都 610054)

【摘要】 运用感应电动势法(EMF)对准光学栅格阵列进行分析,给出了平面栅格的等效电路模型。

结合有源器件的等效电路模型,采用节点分析法对栅格的完整等效电路模型求解环路增益。在 Win95 平台下,编制了平面栅格振荡器阵列的辅助设计程序,设计计算结果与国外文献报道吻合得较好。

关键词 感应电动势法; 准光学; 栅格阵列; 功率合成

中图分类号 TN12

准光学功率合成是发展大功率固态微波功率器件的一种有效途径。它在发展大功率微波振荡器、低相噪微波振荡器、高功率微波功率放大器宽带模拟电路 A/D 变换及数字电路、高功率毫米波放大器等有着十分重要的作用。近年来,准光学栅格阵列的研究工作倍受重视,成为最重要的一类准光学功率合成技术。

准光学栅格阵列由放置于 Fabry-Perot 腔中的二维有源器件阵列组成。谐振腔提供必要的反馈耦合,二维阵列结构可提供大量数目器件的合成。用二端或三端器件加载的周期栅格刻蚀在介质基片上,垂直引线作为天线,水平引线作为直流偏置线。镜面放置于栅格后面以提供振荡必需的反馈,部分透射的反射镜放置于栅格前面以输出微波能量^[1]。在加上直流偏置时,由不稳定性或噪声引起振荡,每个器件在不同的频率振荡,非相干波由栅格辐射出去经镜面反射回来,注入锁定振荡的器件。经过几个往返之后,高阶模式由于绕射损失其大部分功率,导致单一频率自锁定相干振荡和功率合成。设计制作栅格振荡器,确定准光学栅格元件的电磁特性是一个基本的任务。本文基于平面栅格的 EMF 法分析,给出其等效电路模型和设计方法。

1 准光学栅格阵列的 EMF 法分析

对周期栅格确定其等效电路模型的一种特别有效的技术是感应电动势法 (EMF)。外加电流 $J(r)$ 以及产生的电磁场 $E(r)$ 之间的关系,由非均匀波方程给出^[2]

$$\nabla \times \nabla \times E(r) - k^2 E(r) = j\omega\mu J(r) \quad (1)$$

式中 $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 。由辐射结构上的电流 $J(r)$ 所产生的场可用并矢格林函数 $\bar{G}(r|r')$ 给出

$$E(r) = -j\omega\mu \int_V \bar{G}(r|r') \cdot J(r) dV' \quad (2)$$

式中带(')坐标表示含有传导电流分布的区域。一旦电流分布已知,且由方程(2)求出产生的场,对辐射功率可用坡印亭公式确定

$$\oint_S E \times H^* ds = - \int_V E \cdot J^* dV - j\omega \int_V (H^* \cdot B - E \cdot D^*) dV \quad (3)$$

反馈点的策动点阻抗 Z 可以表示为

$$Z = - \frac{1}{|I|^2} \int_V E \cdot J^* dV \quad (4)$$

式中 $|I|$ 是在反馈点的电流分布的幅值。

在一般情况下,式(4)的求解是十分困难的。为使问题易于处理,假定栅格阵列是无限的,边缘效应可以忽略;其次可找到栅格的对称面,由内部对称性得到栅格单元,所有的栅格单元含有相同的直流电流源,锁定于相同的相位。这样,相位锁定源的无限栅格可以表示为等效波导。在等效

1999年1月27日收稿,1999年3月3日修改定稿

* 国防科技预研基金资助项目

** 男 54岁 硕士 教授

波导中的模式电场可以表示为波导模式的迭加

$$\mathbf{E} = e^{TEM} \mathbf{w}^{TEM} + \sum_{m,n} e_{mn}^{TM} \mathbf{u}_{mn}^{TM} + \sum_{m,n} e_{mn}^{TE} \mathbf{v}_{mn}^{TE} \quad (5)$$

式中 e^{TEM} , e_{mn}^{TM} , e_{mn}^{TE} 是待定的展开系数。矢量 \mathbf{w}^{TEM} , \mathbf{u}_{mn}^{TM} 和 \mathbf{v}_{mn}^{TE} 是表示横向 TEM、TM、TE 模式的基本矢量。

栅格金属 (在 $z=0$) 上的外加电流分布可展开为

$$\mathbf{J} = j^{TEM} \mathbf{w}^{TEM} + \sum_{m,n} j_{mn}^{TM} \mathbf{u}_{mn}^{TM} + \sum_{m,n} j_{mn}^{TE} \mathbf{v}_{mn}^{TE} \quad (6)$$

展开系数 j^{TEM} , j_{mn}^{TM} 和 j_{mn}^{TE} 通过假定的电流分布并计算内积 $\langle \mathbf{J} | \mathbf{u}'_{mn} \rangle$ 来确定。注意到 \mathbf{E} 和 \mathbf{J} 的展开系数与 Maxwell 边界条件有关, 可以得到

$$e^{TEM} = -j^{TEM} (Z^{TEM+} \parallel Z^{TEM-}) \quad e_{mn}^{TM} = -j_{mn}^{TM} (Z_{mn}^{TM+} \parallel Z_{mn}^{TM-})$$

$$e_{mn}^{TE} = -j_{mn}^{TE} (Z_{mn}^{TE+} \parallel Z_{mn}^{TE-})$$

这里, +、- 分别表示在正 z 和负 z 方向的固有波阻抗, “ \parallel ” 表示模式阻抗并联相加。波导模式阻抗 Z^{TEM} , Z_{mn}^{TM} 和 Z_{mn}^{TE} 按常规方式给出。应用 EMF 积分与模式展开, 得到嵌入在阵列中的策动点阻抗为

$$Z = \frac{1}{|J_0|^2} \left\{ (Z^{TEM+} \parallel Z^{TEM-}) |j^{TEM}|^2 + \sum_{m,n} |j_{mn}^{TM}|^2 (Z_{mn}^{TM+} \parallel Z_{mn}^{TM-}) + \sum_{m,n} |j_{mn}^{TE}|^2 (Z_{mn}^{TE+} \parallel Z_{mn}^{TE-}) \right\} \quad (7)$$

对特定的栅格结构, 由其电流分布可确定电流展开系数, 因而由式(7)可计算嵌入阻抗。

2 平面栅格的等效电路模型

对平面晶体管栅格结构, 为应用 EMF 法, 假定分段连续的电流分布, 在垂直引线上的垂直方向的电流是均匀分布的。电流在单元格子的边上应当为零, 这里是磁壁。进一步假定所有的电流在引线宽度截面是均匀分布的, 应用这一假想的电流分布以及基本场矢量 \mathbf{w}^{TEM} , \mathbf{u}_{mn}^{TM} 和 \mathbf{v}_{mn}^{TE} , 可以得到表示栅格的二端口网络, 如图 1 所示, 该网络的阻抗项由以下公式给出 (11)

$$Z_0 = \frac{b}{a} (Z^{TEM+} \parallel Z^{TEM-}) \quad (8)$$

$$Z_l = \frac{2b}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \cos^2\left(\frac{m\pi c}{2}\right) \sin^2\left(\frac{m\pi w}{2b}\right) (Z_{mn}^{TE+} \parallel Z_{mn}^{TE-}) \quad (9)$$

$$Z_c = \frac{2}{ab} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{k_y^2} \sin^2\left(\frac{n\pi c}{b}\right) \sin^2\left(\frac{n\pi w}{2b}\right) (Z_{0n}^{TM+} \parallel Z_{0n}^{TM-}) \quad (10)$$

$$Z_l = \frac{4}{ab} \sum_{m,n>0} \frac{1}{k_c^2} \cos^2\left(\frac{n\pi c}{2}\right) \sin^2\left(\frac{n\pi c}{b}\right) \sin^2\left(\frac{m\pi w}{2a}\right) \sin^2\left(\frac{m\pi w}{2b}\right) \times \left\{ \left(1 - \frac{1}{a-w}\right)^2 Z_{mn}^{TM+} \parallel Z_{mn}^{TM-} + \left(\frac{k_y}{k_x} + \frac{k_y a}{k_x (a-w)}\right)^2 Z_{mn}^{TE+} \parallel Z_{mn}^{TE-} \right\} \quad (11)$$

式中 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, $r = \frac{b}{c}$, $k_x = \frac{m\pi}{a}$, $k_y = \frac{n\pi}{b}$, $k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$ 。可以看出, Z_0 是 TEM 阻抗

的并联并表示能量自阵列输出; Z_l 是感应 TM 模式的总和并模拟与垂直引线相关的电感; Z_c 和 Z 是电感和电容模式的总和并表示由水平引线上的电流产生的凋落场; 参量 r 相应于中心抽头变压器的变比。用相应集总电路元件代替模式阻抗, 可得到栅格传输线模型 (TLM), 如图 1 所示。

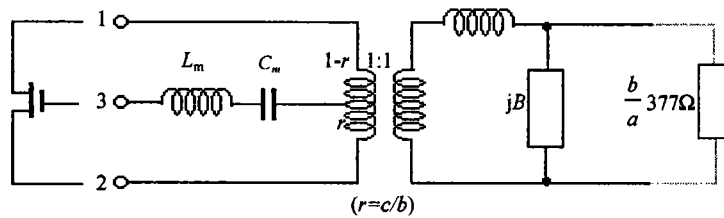


图 1 平面栅格的传输线等效电路模型

3 栅格振荡器的等效电路分析

栅格的传输线模型加上有源器件（如 MESFET）的等效电路模型，即构成栅格振荡器的完整电路模型。采用栅极反馈，即垂直引线端连接于 MESFET 的漏源两极，水平引线端连接于 MESFET 的栅极，完整的等效电路如图 2 所示。晶体管的传导电流受栅源电容两端的电压所控制。电路的环路增益可以通过假定电流源上一个测试电压，进而计算出栅源电容两端所诱发的电压来求得。电压传输系数 V_{out}/V_{in} 即为系统的环路增益，并用以确定振荡的频率。如果某个频率下的环路增益的幅度大于 1，相移为零度时，栅格满足振荡条件，并在该频率下振荡。

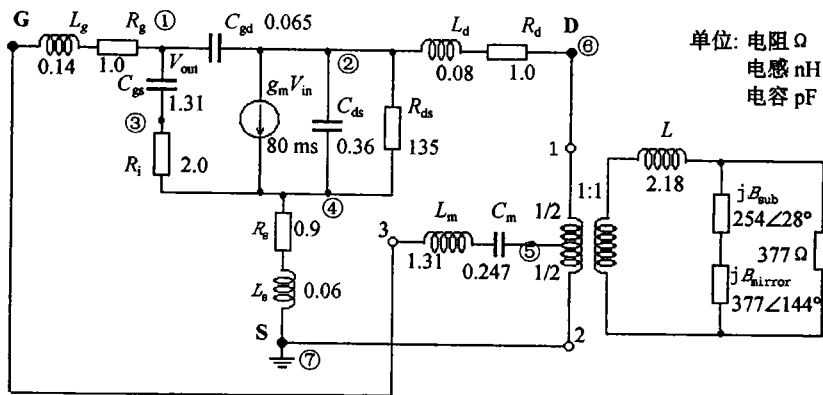


图 2 平面栅格的完整电路模型

另一方面，栅格振荡器单元可以分离为两个部分，一部分是嵌入电路（含有金属栅格、介质基片、镜面和自由空间），它可应用近似法（如上面描述的 EMF 法）来特征化。另一部分是有源器件，它可应用线性 S 参量或非线性电路模型来特征化。嵌入电路和器件模型可以表示为两端口网络。这样栅格振荡器可以视作两端口反馈振荡器的准光学装置。

n 端口反馈振荡器的一般稳态振荡条件为^[3]

$$\det(S S' - I) = 0 \tag{12}$$

式中 S 和 S' 分别是有源器件和嵌入电路 n 端口散射矩阵。对于 $n=2$ ，式(12)简化为

$$S_{11} S'_{11} + S_{12} S'_{21} + S_{21} S'_{12} + S_{22} S'_{22} - |S| |S'| = 1 \tag{13}$$

式中 $|S| = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$ ， $|S'| = S'_{11} S'_{22} - S'_{12} S'_{21}$ 。为了分析这种封闭环形电路，在某点切开环路，并插入能量引出装置，这样可确定环路增益 b_1^*/a_1^* 或环路函数 C

$$C = \frac{b_1^*}{a_1^*} = \frac{S_{11} S'_{11} + S_{21} S'_{12} - |S| |S'|}{1 - S_{12} S'_{21} - S_{22} S'_{22}} \tag{14}$$

注意到，当 $C=1 \angle 0^\circ$ 时，式 (14) 即等效于稳态振荡条件式 (12)。如果式 (14) 是使用晶体管的小信号 S 参量，振荡起始条件要求 $|C| > 1$ 。为达到稳态，增益抑止引起晶体管 S 参量达到饱和，直到振荡频率满足条件 $C=1 \angle 0^\circ$ 。

4 栅格振荡器的程序设计与辅助分析

利用前面的分析结果,运用晶体管的小信号参量和 S 参量,分别对等效电路模型的环路增益和环路函数进行了程序设计,其步骤如下:

1) 计算栅格等效电路参数。利用式(11)由给定的栅格尺寸计算栅格中晶体管引线端所呈现的嵌入阻抗的集总参数 L 、 L_m 、 C_m 。

2) 计算栅格等效电路的负载阻抗。负载包括三部分,一部分是栅格的垂直引线电感,另两部分是沿正 z 方向传播和负 z 方向传播的平面波的波阻抗,相当于两段传输线的并联。

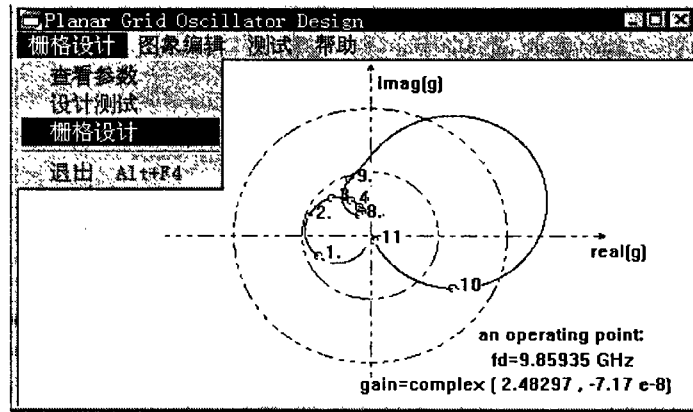


图3 平面栅格的辅助设计

3) 计算环路增益。根据平面栅格的完整电路模型建立节点导纳矩阵,求解各节点电压,进而求得环路增益。

4) 求工作频率点。当某个频率下环路增益的幅度大于1,相移为零度时,即满足振荡条件,栅格就在此频率下振荡工作。

运用 S 参量的环路函数法的程序设计与此类似,此处不再赘述。

利用所设计的程序,对栅格振荡器的性质进行了测试与分析,与预想的结果以及文献报道符合得较好。改变栅格到平面镜之间的距离,可以调谐振荡器的工作频率。考虑栅格到平面镜之间的距离略微增大时,相当于在相同的纵向波数下谐振波长增加,因而谐振频率降低。即工作频率随着镜面距离的增加而降低。辅助设计的结果表明,当镜面距离由11.4 mm增加到18.8 mm时,工作频率由10.107 GHz降到9.121 GHz,频率调谐大约10%,如图4所示。另外,有源阵列中各电流元同频同相地振荡,无疑是最理想的情况。利用程序模拟的结果,证实了如下的结论:在小信号注入的情况下,锁定带宽与注入信号幅度成正比;当振荡器锁定在注入信号时,注入信号与振荡电流的相位差调谐在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 范围内,如图5所示,图中在稳态情况下,注入锁定信号与振荡电流间的相位差。

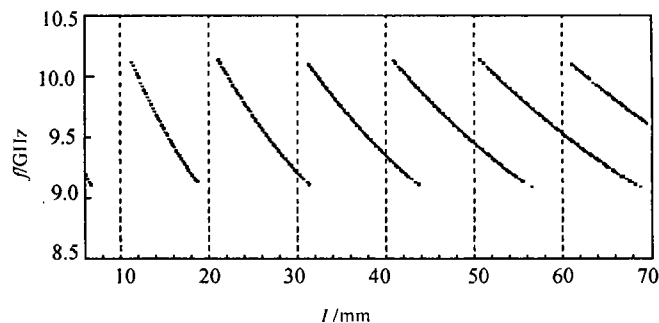


图4 振荡频率与镜面距离的关系的辅助测试

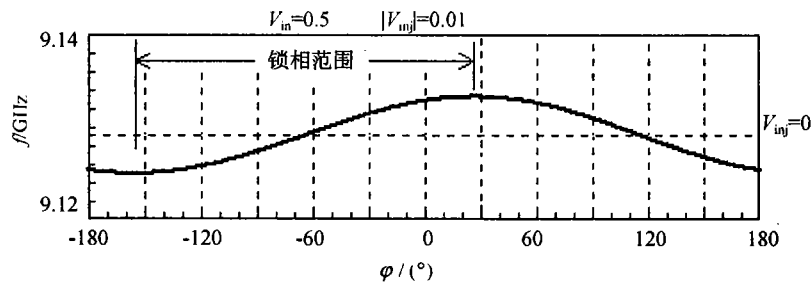


图5 平面栅格振荡器辅助设计的锁相测试

6 结论

平面栅格振荡器阵列是一类重要的准光学功率合成器。基于 EMF 法分析, 可给出平面栅格的等效电路模型。对平面栅格振荡器的完整电路进行分析, 运用节点分析法求其环路增益, 并用以确定振荡器的工作点。应用自行编制的计算机辅助程序进行测试与分析, 与预期的结果及文献的报道吻合较好。

参 考 文 献

- 1 Popovic Z B, Weikle R M, Kim M *et al.* A 100-MESFET planar grid oscillator. IEEE Trans-MTT, 1991,39(2):193~199
- 2 Eisenhart R L, Khan P J. Theoretical and experimental analysis of a waveguided mounting structure. IEEE Trans-MTT, 1971,19(8):706~719
- 3 Shiroma W A, Popovic Z B. Analysis and optimization of grid oscillators. IEEE Trans-MTT, 1997,45(12): 2 380~2 386
- 4 Weikle R M, Kim M, Hacker J B *et al.* Planar MEWSFET grid oscillators using gate feedback. IEEE Trans-MTT, 1992,40(11):1 997~2 003

Analysis and Design of Quasi-optical Grid Arrays Using EMF Method

Xie Wenkai Zhang Bangshu

(Inst. Of High Energy Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The equivalent circuit model of planar grid is obtained based on the analysis of quasi-optical grid arrays using EMF method. The complete transmission line circuit model of the planar grid oscillator arrays is analyzed using the equivalent circuit model of the active device. The loop-gain is obtained by node-analysis method. A developed software is on the platform of Windows 95. for designing planar grid oscillator arrays. The results come out to be a good agreement with theoretical analysis and reports from home and foreign documents.

Key words the induced electromotive force method; quasi-optical; grid arrays; power-combining