

毫米波 Gunn 器件谐波振荡器电路分析*

徐金平

(南京航空航天大学电子工程系, 江苏, 南京, 210016)

TN75 2.7

摘要 根据 GaAs Gunn 器件的谐波大信号特性, 应用描述函数法对毫米波二次谐波振荡器的电路特性进行了研究, 分析了振荡频率和输出功率随器件大信号特性参数与外电路参数变化的规律, 所得结论与实验结果一致。

关键词 Gunn 器件, 谐波振荡器, 描述函数。

毫米波 电路

引言

1982年, Solbach^[1]提出了 Gunn 器件谐波振荡器的一种电路模型, 但在分析计算时没有严格区分谐波和基波工作状态下的器件的大信号模型。事实上, 两种状态下的特性有很大的差别^[2]。1989年, 我们提出了谐波振荡器的一种反馈模型^[3], 分析了输出功率和谐波注入锁定特性, 但没有讨论振荡频率问题, 而且缺少器件模型的具体参数, 所以不能准确地定量描述电路性能。

本文根据文献[2]提出的 Gunn 器件谐波大信号模型, 应用描述函数法对毫米波二次谐波振荡器的振荡频率和输出功率进行了数值计算与分析, 给出了谐波功率与大信号特性参数的关系曲线和振荡频率与输出功率随外电路参数的变化曲线。

1 等效电路

参考 Solbach^[1]的电路模型, 给出二次谐波振荡器的一般等效电路(见图1)。其中 G_1 和 G_2 分别为基波负载电导和谐波负载电导, LN 是一频率多路传输网络, 它将器件上的基波电压和电流分配给基波电路, 将谐波电压和电流分配给谐波电路, i_{s1} 和 i_{s2} 分别表示基波电路和谐波电路的注入信号源, 对于自由振荡状态, $i_{s1} = i_{s2} = 0$ 。有源器件两端的电压取基波和二次谐波二个分量, 其余分量被认为是射频短路。采用电压-电流传输矩阵表示有源器件与负载电导之间的耦合电路特性。分析稳态情况时, 有

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_\sigma \\ \dot{I}_\sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}(j\omega) & T_{12}(j\omega) \\ T_{21}(j\omega) & T_{22}(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中 $i=1$ 和 $i=2$ 分别对应于基波电路和谐波电路, 耦合电路两端的实际电压和电流与对应的复数量的关系为 $v_i = \text{Re}[\dot{V}_i e^{j\omega t}]$, 其余类似。

利用方程(1)和关系式 $G_i \dot{V}_\sigma = \dot{I}_\sigma - \dot{I}_\sigma$, 可建立谐波振荡器电路的反馈模型^[3]。应用非线

* 国家自然科学基金与航空科学基金资助项目
本文1995年9月3日收到, 修改稿1996年2月5日收到

性器件的描述函数,可以将基波电路和谐波电路分解成两个形式上相互独立的回路,从而可方便地建立其电路方程.

2 描述函数与电路方程

在谐波模工作状态下,GaAs Gunn 器件的大信号特性可表示为

$$i_d = b_1 v_d + b_2 v_d^2 + b_3 v_d^3, \quad (2)$$

由于谐波工作时器件上同时作用有基波和谐波大信号电压,其非线性特性与基波工作状态下的特性有很大的差别^[2],即上式中的各个展开系数和基波工作状态下的系数不同.设作用于有源器件两端的电压为

$$v_d = v_1 + v_2 = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos(\omega_2 t + \varphi), \quad (3)$$

式(3)中 ω_1 为基波频率, $\omega_2 = 2\omega_1$ 为谐波频率, φ 是谐波电压的初相位,基波电压的初相位假定是 0.将式(3)代入式(2),展开得到 i_d 中基波和二次谐波电流分量的表达式.按照多重正弦输入描述函数的定义^[4,5],可得非线性器件在基波频率和谐波频率上的描述函数分别为

$$N_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} = b_1 + \frac{3}{4} b_3 V_1^2 + \frac{3}{2} b_3 V_2^2 + b_2 V_2 e^{-j\varphi}, \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} = b_1 + \frac{3}{2} b_3 V_1^2 + \frac{3}{4} b_3 V_2^2 + \frac{1}{2} b_2 \frac{V_1^2}{V_2} e^{-j\varphi}, \quad (5)$$

式中 N_1 和 N_2 亦可看作为有源器件分别在频率 ω_1 和 ω_2 上的非线性导纳.

利用上述描述函数和等效电路的反馈模型,可方便地建立基波和谐波电路方程.电路方程亦可直接根据等效电路图 1 导出.在自由振荡状态下,它们是

$$N_i \frac{G_i T_{12}(j\omega_i) + T_{22}(j\omega_i)}{G_i T_{11}(j\omega_i) + T_{21}(j\omega_i)} + 1 = 0, \quad (6)$$

式(6)中 $i=1$ 和 $i=2$ 分别对应基波和谐波电路.为简化分析计算,基波耦合电路和谐波耦合电路考虑最基本的 LC 并联电路结构.将其电压—电流传输矩阵的各元素及 N_1 和 N_2 的表达式代入方程(6),并令 $G_i = 0$ 得

$$b_1 + b_2 V_2 \cos \varphi + \frac{3}{4} b_3 V_1^2 + \frac{3}{2} b_3 V_2^2 + j b_2 V_2 \sin \varphi + j(\omega_1 C_1 - 1/\omega_1 L_1) = 0, \quad (7)$$

$$b_1 + G_2 + \frac{1}{2} b_2 \frac{V_1^2}{V_2} \cos \varphi + \frac{3}{2} b_3 V_1^2 + \frac{3}{4} b_3 V_2^2 - j \frac{1}{2} b_2 \frac{V_1^2}{V_2} \sin \varphi + j(\omega_2 C_2 - 1/\omega_2 L_2) = 0, \quad (8)$$

方程(7)和(8)确定了谐波振荡器在所给电路模型中的电压幅度和振荡频率.

3 振荡频率

设基波电路和谐波电路的固有谐振频率分别为 ω_{10} 和 ω_{20} .在固有谐振频率附近,基波电路和谐波电路的电纳可分别近似表示为 $B_1 \approx 2C_1(\omega_1 - \omega_{10}) = 2Y_{01}\Delta Y_1$, $B_2 \approx 2C_2(\omega_2 - \omega_{20}) =$

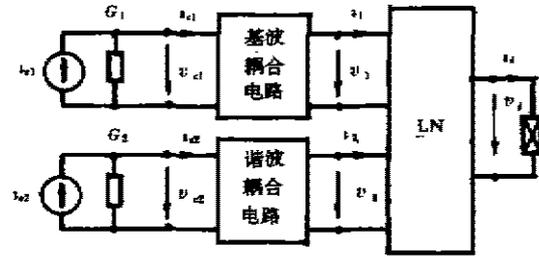


图 1 谐波振荡器等效电路
Fig. 1 Equivalent circuit of harmonic oscillators

$2Y_{02}\Delta Y_2$. 其中 Y_{01} 和 Y_{02} 是电纳斜率参数, $Y_{01} = \omega_{10}C_1$, $Y_{02} = \omega_{20}C_2 = Q_{e2}G_2$, Q_{e2} 为谐波外电路品质因数, $\Delta Y_1 = (\omega_1 - \omega_{10})/\omega_{10}$, $\Delta Y_2 = (\omega_2 - \omega_{20})/\omega_{20}$. 当 $\omega_{20} = 2\omega_{10}$ 时, $\Delta Y_1 = \Delta Y_2 = \Delta Y$. 令方程(7)左边虚部等于 0 得

$$\frac{\omega_1}{\omega_{10}} = 1 - \frac{b_2 V_2}{2Y_{01}} \sin \varphi; \quad (9)$$

再令方程(8)左边虚部等于 0, 并将 $\omega_2 = 2\omega_1$ 及式(9)代入并整理得

$$\sin \varphi = (2\omega_{10} - \omega_{20})V_2 / [b_2 (\frac{\omega_{20}}{4Y_{02}} V_1^2 + \frac{\omega_{10}}{Y_{01}} V_2^2)]; \quad (10)$$

根据文献[2], 取 V 波段谐波工作状态下 GaAs Gunn 器件大信号特性展开系数的一组典型值 $b_1 = 2.5 \times 10^{-2} \text{A/V}$, $b_2 = -8.0 \times 10^{-3} \text{A/V}^2$, $b_3 = -2.5 \times 10^{-3} \text{A/V}^3$. 根据对应的基波振荡器的外电路品质因数和负载电导的典型值, 取 $Y_{01} = \omega_{10}C_1 = Q_{e1}G_1 = 5 \text{A/V}$. 另外, 由下面谐波电压的计算结果可知, V_2 小于 1V. 因此, 式(9)中 $|b_2 v_2 / 2Y_{01}|$ 的数量级为 10^{-4} , 而 $|\sin \varphi| \leq 1$, 从而由此式可知 $\omega_1 \approx \omega_{10}$, 即谐波振荡器的振荡频率主要取决于基波电路的固有谐振频率. 当 $\omega_{20} = 2\omega_{10}$ 时, $\sin \varphi = 0$, 有 $\omega_1 = \omega_{10}$.

我们知道, 在谐波振荡器的实验研究中, 调节谐波短路活塞, 即改变谐波回路的固有谐振频率 ω_{20} , 对振荡频率几乎没有影响. 上述结论从理论上清楚地解释了谐波振荡器关于振荡频率的实验现象.

图 2 中给出了振荡频率随相位 φ (它取决于外电路参数、电压幅度及系数 b_2) 的变化曲线, 由图 2 可见, φ 在 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 范围内, ω_1/ω_{10} 的变化量为 $\pm 3.5 \times 10^{-4}$.

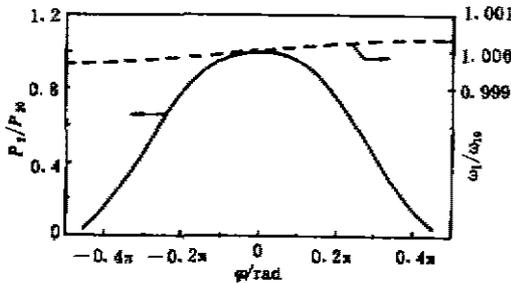


图 2 振荡频率和输出功率随 φ 的变化曲线
Fig. 2 Oscillation frequency and output power versus initial phase φ

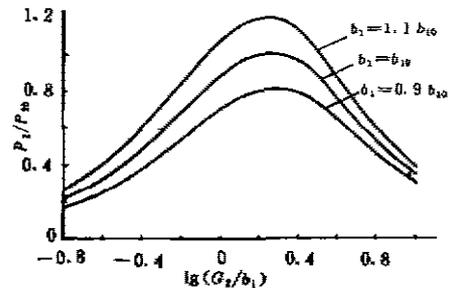


图 3 谐波功率随负载电导及大信号展开系数 b_1 的变化曲线
Fig. 3 Harmonic power versus load conductance with large signal expansion coefficient b_1 as a parameter

4 谐波输出功率

令方程(7)和(8)左边实部等于 0, 合并这两式可导出谐波电压幅度的非线性方程

$$-\frac{9}{4}b_3 V_2^2 - 3b_2 \cos \varphi V_2 - b_1 - \frac{2}{3} \frac{b_2^2}{b_3} \cos^2 \varphi + G_2 - \frac{2}{3} \frac{b_1 b_2}{b_3} \cos \varphi \frac{1}{V_2} = 0, \quad (11)$$

通过此方程可解出谐波电压幅度 v_2 或谐波功率 P_2 .

本文计算得到了以大信号特性展开系数 b_1 、 b_2 和 b_3 为参变量的谐波功率随负载电导的变化曲线. 图 3 给出了以 b_1 为参变量的变化曲线, 其中 $b_{10} = 2.5 \times 10^{-2} \text{A/V}$, P_{20} 为上述所取

器件典型参数条件下的最大输出功率. 计算时假定电路满足条件 $\omega_{20} = 2\omega_{10}$, 从而有 $\sin\varphi = 0$. 根据计算结果可以得到如下结论:

(1) 存在一个最佳谐波负载电导, 使谐波输出功率达到最大值. 对于给定的大信号特性展开系数及其附近的值, 改变负载电导时最大输出功率出现在 $\lg(G_2/b_1)$ 为 0.2~0.4 之间.

(2) 在所取器件大信号特性展开系数典型值附近, b_1 和 b_3 对谐波输出功率影响较为显著. b_1 越大, 输出功率越大; $|b_3|$ 越大, 输出功率越小. 输出功率还随着 $|b_2|$ 的增大而增加, 但在所给典型值附近, 功率变化幅度相对较小.

上述结论与文献[1]中的有关结论有一定的差异, 这是由于该文中器件大信号特性展开系数 C_1 和 C_3 取的是基波工作状态的数值, 不能准确地描述谐波工作状态下器件的非线性特性.

利用上述结果, 在已知器件非线性特性时, 可以预先计算出最佳负载电导, 据此在振荡器中可进行径向线阻抗变换器等结构尺寸的设计, 并能指导实验调试; 也可以根据大信号特性参数, 选择较大谐波功率的有源器件; 另外, 结合器件大信号特性求解方法, 在研制 Gunn 器件的过程中, 上述结果对于有源区长度、掺杂浓度等参数的设计也具有指导意义.

图 2 中给出了谐波输出功率随初相位 φ 的变化曲线, 可见输出功率随 φ 变化显著. 由式 (10) 可知, φ 与 ω_{10} 和 ω_{20} 直接有关, 因此可以推断, 基波电路和谐波电路固有谐振频率的改变对谐波输出功率具有显著影响, 这一结论也与实验结果相符. 在实验中, 调节基波短路活塞, 不仅可以改变振荡频率, 而且输出功率也有很大的变化(通常大大降低). 这时需要再调节谐波短路活塞, 使 $\omega_{20} = 2\omega_{10}$ 的条件重新得到满足(此时 $\sin\varphi = 0$), 才使输出功率达到最大值.

上述结论从电路理论上清楚地解释了实验研究中谐波振荡器输出功率和振荡频率的特殊变化规律. 应用上述方法, 作者对谐波振荡器的谐波注入锁定特性进行了分析研究, 其结果见文献[6].

5 结论

本文根据谐波工作状态下 Gunn 器件的大信号特性, 应用描述函数法研究了毫米波二次谐波振荡器的振荡频率和输出功率. 结果表明, 振荡频率主要取决于基波电路的固有谐振频率; 在所取器件参数典型值附近, 谐波功率随 b_1 和 $|b_2|$ 的增大而增加, 随 $|b_3|$ 的增大而减小; 另外, 基波电路和谐波电路的固有谐振频率亦是决定输出功率的重要因素. 本文从电路理论上较好地解释了 Gunn 器件谐波振荡器实验研究中关于振荡频率和输出功率的特殊的规律, 它对工程设计与调试具有指导作用.

参考文献

- 1 Solbach K. *IEEE Trans. MTT*, 1982, MTT-30(8):1233
- 2 陈 宁. 三毫米固态锁相源研究. 南京: 东南大学无线电工程系博士学位论文, 1990
- 3 Xu J P, Li S F. *Int. J. Infrared Millim. Waves*, 1989, 10(9):1093
- 4 Gustafsson L, et al. *IEEE Trans. MTT*, 1972, 20(6):402
- 5 Gelb A, et al. *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design*. New York: McGraw-Hill, 1968
- 6 Xu J P. *Int. J. Infrared Millim. Waves*, 1994, 15(12):2061

ANALYSIS OF MILLIMETER WAVE GUNN HARMONIC OSCILLATORS BY A CIRCUIT MODEL *

Xu Jinping

*(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)*

Abstract By applying the describing function method, the circuit performance of millimeter wave second harmonic oscillators was investigated based on a large signal model of GaAs Gunn diode at harmonic frequencies. The oscillation frequency and the output power were calculated as the functions of the nonlinear characteristic and the external circuit parameters. The deduced conclusions are in coincidence with the experiments.

Key words Gunn diodes, harmonic oscillators, describing function.

* The project supported by the National Natural Science Foundation and the Aeronautical Science Fund of China