

# 带有小型化 Balun 的 C 波段单片 GaAs pHEMT 单平衡电阻性混频器

李志强, 张 健, 张海英

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 本文介绍了一种带有小型化无源 Balun 的 C 波段单片 GaAs pHEMT 单平衡电阻性混频器. Balun 采用集总—分布式结构, 使其长度与常用  $\lambda/4$  耦合线 Balun 相比缩小了 11 倍, 大大降低了将无源 Balun 应用于 C 波段单片集成电路中所需的芯片尺寸. 混频器采用单平衡电阻性结构, 在零功耗的情况下实现了良好的线性和端口隔离性能. 测试结果显示, 在固定中频 160 MHz, 本振输入功率 0 dBm 条件下, 在 3.5~5 GHz RF 频带内, 最小变频损耗为 8.3 dB, 1 dB 压缩点功率为 8.0 dBm, LO 至 IF 之间的隔离度为 38 dB.

**关键词:** 砷化镓基赝配高电子迁移率晶体管; 电阻性混频器; 小型化 Balun; 集总—分布式

**中图分类号:** TN77 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 12-2454-04

## G Band Monolithic GaAs pHEMT Resistive Single-Balanced Mixer with Miniaturized Balun

LI Zhi-qiang, ZHANG Jian, ZHANG Hai-ying

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A G-band GaAs pHEMT single-balanced resistive mixer with miniaturized balun is presented. By using lumped-distributed structure, the coupled line length was reduced by a factor of 11 compared with the conventional  $\lambda/4$  coupled line balun. This balun was then used in a resistive mixer to transform the input single-ended signal into differential. The mixer achieved good linearity and port isolation performance with zero power consumption. Test results showed that, with a fixed IF of 160 MHz and 0 dBm LO power, the minimum conversion loss is 8.3 dB in 3.5~5 GHz RF frequency range. The measured 1 dB compression point is 8 dBm and the LO-to-IF isolation is better than 38 dB.

**Key words:** GaAs pseudomorphic high electron mobility transistors (pHEMT); resistive mixer; miniaturized balun; lumped-distributed

### 1 引言

近来, 随着无线通信技术的飞速发展, 人们对小型、低功耗、高线性接收机的需求日益增大. 作为射频前端的关键部件之一, 混频器的某些性能指标, 比如变频损耗、端口间匹配、隔离度、尤其是线性, 直接决定了接收机可能达到的最佳性能.

电阻性混频器由 S. A. Maas 于 1987 年最初提出<sup>[1]</sup>, 具有高线性、低  $1/f$  噪声、零功耗、低本振驱动要求等优点. 相对于二极管混频器, 电阻性混频器则只有热噪声而没有散粒噪声<sup>[1]</sup>. GaAs pHEMT 电阻性混频器则更是很好的避开了 pHEMT 器件闪烁噪声角频率较高<sup>[2]</sup>的缺点, 降低了 pHEMT 器件被应用于零中频方案的设计难度. 此外, 相对于 MESFET 电阻性混频器, HEMT 电阻性混频器由于在开关过程中沟道电阻变化更陡峭, 导通电

阻和栅电容乘积更小, 其对本振功率的要求更低, 工作频段也更宽<sup>[3]</sup>. 这些特点使得 GaAs pHEMT 电阻性混频器被广泛应用于微波单片收发机中.

实际应用中混频器通常采用平衡结构来获得较小的变频损耗和较大的端口间隔离度. 各种 Balun 则用来将从 LNA 处获得的单端射频信号转换为混频器平衡工作所需要的差分信号. 相比于有源 Balun, 无源 Balun 具有无直流功耗、低失真的优点. 在微波频段内, 已经有很多种不同结构的无源 Balun<sup>[4,5]</sup>被相继报导, 但是这些结构绝大部分并不适用于 C 波段单片集成电路.

无源 Balun 可以由分布参数元件或集总参数元件构成. 分布式 Balun 一般包含若干段  $\lambda/2$  传输线或  $\lambda/4$  耦合线. 在 X 波段以下, 该结构过大的面积限制了其应用<sup>[2]</sup>.  $\lambda/4$  耦合线可以通过弯曲使其紧凑<sup>[4]</sup>, 或者用螺旋变压器来代替, 从而减小尺寸. 然而, 这些方法由于需

要电磁场仿真或者基于测量的定性而增加了设计难度。此外,这些分布式 Balun 往往采用非平面或多层结构,增加了工艺复杂性。集总式 Balun 则采用低通高通滤波器结构<sup>[5]</sup>。这种结构往往需要大量的集总元件,且难以在一定带宽内保持两路输出之间的平衡。集总-分布式 Balun 在分布式 Balun 合适的位置上添加少量集总参数元件使得所需要的耦合线长度远小于  $\lambda/4$ <sup>[6,7]</sup>。采用该方法设计的无源 Balun 由于突破了传统耦合线 Balun 的长度限制而被广泛应用于微波单片集成电路中。

本文中,集总-分布式 Balun 由两段耦合线和两个电容构成,以较小的尺寸实现了 C 波段无源 Balun 的单片集成。通过适当的优化,使其在耦合线长度、平衡度、变频损耗、带宽等各项性能指标方面得到合理的折衷。之后,该 Balun 被应用到单平衡电阻性混频器中,完成对输入 RF 信号的平衡-差分转换。单平衡电阻性混频器采用源漏偏压为零的 GaAs pHEMT 器件实现,在无直流功耗的情况下,表现出了良好的性能。

## 2 集总-分布式 Balun 设计

Balun 是一个单端输入,双端输出的三端口网络。这里用端口 1 表示输入端口,端口 2 和 3 表示差分输出的输出口。实际分析中,通常加入一个短路或开路端口,形成对称四端口网络以简化分析,这里用  $Y_{in}$  表示源导纳,  $Y_{out}$  表示负载导纳。Balun 将由  $Y_{in}$  提供的单端输入信号转换为负载  $Y_{out}$  上的平衡信号。一般的,  $Y_{in}$  与  $Y_{out}$  并不相同。因此,除了提供差分输出,该 Balun 还需要进行阻抗变换以获得输入端的匹配。由此,可以得到该 Balun 正常工作所需要满足的  $S$  参数方程:

$$\begin{aligned} S_{21} &= -S_{31} \\ S_{11} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

采用偶模-奇模分析法<sup>[8]</sup>,考虑到其中的“任意阻抗”此时已经由接地短路代替,即  $\Gamma = -1$ ,上述两方程可以转化为:

$$\begin{aligned} T_{even} &= 0 \\ Y_{even} + Y_{odd} &= 2Y_{in} \end{aligned} \quad (2)$$

可见,为了达到理想的幅度和相位平衡,在偶模电路中,该 Balun 传输系数需为 0,相当于开路。同时,为了在输入端获得良好的匹配,奇模和偶模的导纳之和应等于两倍的源电导。

本文中所采用的 Balun 结构如图 1 所示,无论频率及  $\theta$ ,其偶模电路传输系数均为 0,故理论上可实现理想的与频率无关的幅度和相位平衡。

此时,式(2)中输入匹配的要求转换为:

$$\left(\frac{Y_{out}}{Y_{in}}\right)(Y_{oe} - Y_{eo})^2 - (8\sin^2\theta)\left(Y_{out}^2 + \left(\frac{Y_{oe} + Y_{eo}}{2\tan\theta} - 2wc_1\right)^2\right) = 0$$

$$(Y_{oe} + Y_{eo})\left(\tan\theta + \frac{1}{\tan\theta}\left(\frac{2Y_{in}}{Y_{out}} - 1\right)\right) + 4(wc_2 - \left(\frac{2Y_{in}}{Y_{out}}\right)wc_1) = 0 \quad (3)$$

其中  $\theta$  表示耦合线电长度。理论上,对于给定的  $\theta$ ,我们可以找到多组  $C_1, C_2, Y_{oe}, Y_{eo}$ ,使其满足方程组(3),实际设计过程中,可以先将  $Y_{out}$  经阻抗匹配转换成 50ohms,从而降低求解上述方程的难度。实际设计中发现,该结构中,电容  $C_1, C_2$  的存在能大幅减小了耦合线的长度,但都导致 Balun 带宽的缩小;电容  $C_2$  的值可以为 0,但非零的  $C_2$  能进一步减小耦合线长度;较小的  $Y_{oe}$  能获得较大的带宽。

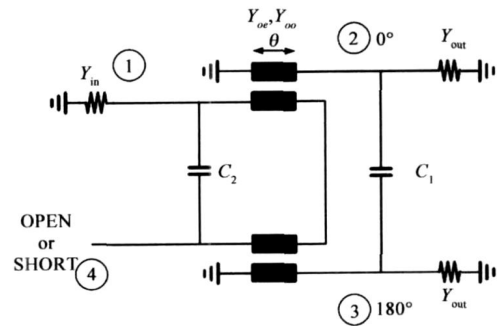


图1 本文所采用的 Balun 结构

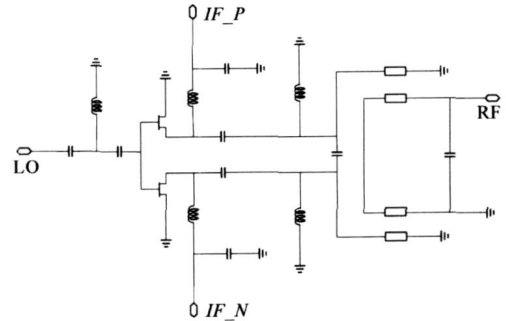


图2 混频器电路图（偏置电路没有给出）

本设计中,经过与电阻性混频器一起的整体优化仿真,最终选择耦合线宽度为 20 $\mu\text{m}$ ,线间距离为 10 $\mu\text{m}$ ,长度为 600 $\mu\text{m}$ ,相比于该工艺条件下 4GHz  $\lambda/4$  波长 6600 $\mu\text{m}$  的长度缩小了 11 倍。电容值大小为  $C_1 = 1.4\text{pF}$ ,  $C_2 = 1.2\text{pF}$ 。对该 Balun 幅度、相位随频率变化趋势进行仿真显示:在 3.5~5GHz 频率范围内实现了较好的幅度和相位平衡。

## 3 单平衡电阻性混频器设计

电阻性 HEMT 混频器中,HEMT 源漏偏置电压均为 0,工作于线性区,其沟道电阻随栅压变化。当在栅上施以本振驱动电压(LO)时,沟道电阻成为以本振信号频率变化的时变电阻。此时,漏(源)端输入的 RF 信号相当于被以 LO 频率采样,由此完成频率转换<sup>[1]</sup>。由于其电阻特性,该结构的混频器具有优异的线性性能。

本设计中,LO 信号同相馈入两 pHEMT 栅极,RF 信

号经由 Balun 后平衡输入到两 pHEMT 管的漏端, 输出从晶体管漏端取出. 图 2 给出了该混频器的电路图.

晶体管尺寸的选择需考虑到以下两个方面: 较大的晶体管更容易匹配, 同时容易获得更大的变频效率; 较小的晶体管栅宽将获得更好的端口间隔离度, 对本振功率的要求也较小. 本设计中, 选择栅宽为  $150\mu\text{m}$ , 同时采用交叉指结构降低寄生.

栅压的选择一般选取于略小于夹断电压以获得最大的沟道电阻变化率. 事实上, 由于并非理想开关, 有限的导通电阻、非无穷的关闭电阻以及非零的状态转换时间都将严重制约混频器的性能. 由此, 要获得良好的混频器性能, 需将器件偏置于略小于夹断电压, 同时保证足够的本振信号功率<sup>[3]</sup>. 本设计中, 晶体管夹断电压为  $-0.75\text{V}$ , 由此, 栅压选择在  $-0.8\text{V}$ , 本振信号功率为  $0\text{dBm}$ .

栅压通过高品质因数的 RF choke 馈入以减小自偏置效应. 仿真表明, 如果所用的 RF choke 含有较大的寄生电阻, 则输入 LO 信号将在该寄生电阻上产生压降, 改变晶体管栅极偏置, 从而影响混频器性能. 本设计中, 使用片上电感而不是外部 bonding wire 以实现完全的单片电路. 所使用的 RF choke 其值为  $5.8\text{nH}$ , 在  $4\text{GHz}$  下  $Q$  值约为  $13.6$ .

在晶体管漏端, 采用两个  $L$  型网络并联将晶体管漏端阻抗变换至  $50\Omega$ , 以降低小型化 Balun 的设计难度. 其中, 一个低通  $L$  型网络将输出中频信号引出, 一个高通  $L$  型网络则将输入射频信号馈入至晶体管漏端, 在完成阻抗变换的同时, 还实现了较好的口间隔离度. 晶体管的栅极则通过  $T$  型网络实现阻抗匹配.

将小型化 Balun 与上述电阻性混频器组合在一起, 构成完整的单平衡电阻性混频器, 并对整体优化仿真.

#### 4 芯片实现及测试结果

该芯片采用  $0.25\mu\text{m}$  pHEMT 工艺实现, 包括焊盘的芯片整体尺寸为  $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ , 采用单电源负压供电, 无直流功耗. 混频器测试采取 COB (chip on board) 方式. 为了减小键合线引入的寄生电感的影响, 芯片与外部焊盘

之间的距离应尽可能小. 实际设计中, 根据工艺条件, 选择外部焊盘与芯片边缘距离为  $0.1\text{mm}$ . 考虑到键合线空间的弯曲以及芯片边缘至芯片内部实际焊点的距离, 以  $0.2\text{nH}$  的电感来近似的模拟键合线的影响, 并在之前的仿真中将其考虑在内. PCB 上信号线两侧以地平面包围, 按照 CPW 的方式计算线宽以及间距使其特征阻抗为  $50\Omega$ . 图 3 给出了经键合后的芯片照片, 图中芯片右部即是小型化的耦合线 Balun.

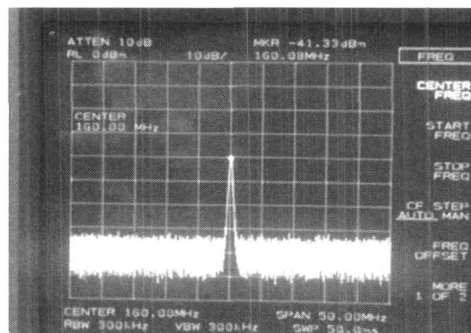


图4 输入信号 $-30\text{dBm}$ 下单端输出功率

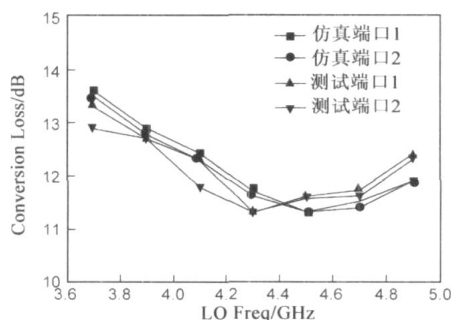


图5 仿真和测试单端输出变频损耗

图 4 给出了  $4.3\text{GHz}$ ,  $0\text{dBm}$  本振驱动,  $4.14\text{GHz}$ ,  $-30\text{dBm}$  射频信号功输入情况下单端输出频谱图. 从图中可以看出, 在该测试条件下, 混频器单端输出变频损耗为  $11.3\text{dB}$ , 由于单平衡混频器的差分输出特性, 实际变频损耗等于上述测量值减去  $3\text{dB}$ , 即  $8.3\text{dB}$ . 单端输出的 LO-IF 隔离度为  $38.7\text{dB}$ , 考虑到 LO 在两输出端同相, 差分应用中其泄漏信号将被抵消, 进一步提高了隔离性能. 图 5 给出了固定中频  $160\text{MHz}$ 、高本振、本振信号频率从  $3.6\text{GHz}$  到  $5.0\text{GHz}$  频带内的仿真和测试单端变频

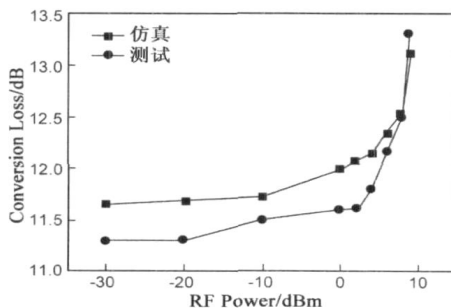


图6 仿真和测试的变频损耗随输入功率变化曲线

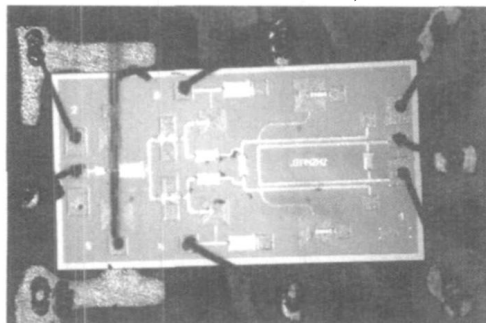


图3 键合后的电阻性单平衡混频器照片

损耗曲线. 在该频段内, 测试与仿真结果符合较好. 同时, 无论是测试和仿真, 该混频器的两路输出都体现了很好的幅度平衡性. 图 6 给出了 4.3GHz 本振、4.14GHz 射频输入信号情况下, 仿真和测试的单端变频损耗随输入信号功率变化曲线. 从图中可以看出, 该测试条件下, 该混频器 1dB 压缩点功率为 8dBm.

## 5 结论

本文介绍了一种带有小型化 Balun 的电阻性混频器. 通过采用集总—分布式结构, 大大降低了 Balun 中耦合线的长度, 从而以较小的芯片面积实现了 C 波段下的无源耦合线 Balun 与电阻性混频器的单片集成. 测试结果表明, 在无直流功耗的情况下, 该混频器在 3.5 ~ 5GHz 范围内实现了较好的变频损耗、线性、隔离度等性能.

## 参考文献:

- [1] Maas S A. A GaAs MESFET mixer with very low intermodulation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(4): 425–429.
- [2] Robertson I D, Lucyshyn S. RFIC and MMIC Design and Technology[M]. The Institution of Electrical Engineers: London, 2001: 59–76, 307–314.
- [3] Chen T H, Chang K W, Bui S B T, et al. Broadband single and double balanced resistive HEMT monolithic mixers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995 43(3): 477–484.
- [4] Nishikawa K, Toyoda I, Tokumitsu T. Compact and broad band three dimensional MMIC balun[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(1): 96–98.

- [5] Chiou H K, Lin H H, Chang C Y. Lumped element compensated high/low pass balun design for MMIC double balanced mixer[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1997, 7(8): 248–250.
- [6] Ojha S P, Branner G R, Kumar B P. A miniaturized lumped-distributed balun for modern wireless communication systems[A]. Proc IEEE 39th Midwest Circuits and Systems Symp[C]. Ames, Iowa: IEEE, 1996. 3: 1347–1350.
- [7] Tang C W, Chang C Y. A semi-lumped balun fabricated by low temperature co-fired ceramic[A]. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp[C]. Dig, Seattle, Washington: IEEE, 2002. 2201–2204.
- [8] Leong Y C, Ang K S, Lee C H. A derivation of a class of 3-port baluns from symmetrical 4-port networks[A]. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp[C]. Dig, Seattle, Washington: IEEE, 2002. 1165–1168.

## 作者简介:



李志强 男, 1982 年 3 月出生于河南省孟州市, 2004 年毕业于吉林大学微电子学与固体电子学专业, 现为中国科学院微电子研究所在读博士研究生, 主要研究方向为 CMOS 射频集成电路和 GaAs MMIC 设计.  
E-mail: lizhiqiang@ime.ac.cn



张健 男, 1981 年 12 月出生于湖北省天门市, 2003 年毕业于浙江大学电子信息工程专业, 2008 年获得中国科学院微电子研究所博士学位, 主要研究方向为 CMOS 射频集成电路和 GaAs MMIC 设计.