

八毫米脉冲高功率雪崩管振荡器

杨玉芬 张黄河 王保强 侯梦会 吴晓东 彭斌

(中国科学院半导体研究所)

1989年10月13日收到

本文简述了 IMPATT 器件的设计、制造工艺、振荡器的微波电路结构和脉冲调制的研制。对脉冲偏置期间产生的频啁效应作了原理性的说明，并提出了减小频啁带宽的方法。目前所研制的八毫米雪崩管振荡器输出功率在 20W 以上，最大脉冲输出功率在 35.5GHz 时达到 48W。重复频率在 1—100kHz 范围内可调，脉宽从 50ns—1μs 可调。频率稳定，工作可靠。

主题词 振荡器，毫米波固态源，调制器

一、引言

大功率脉冲 IMPATT 振荡器作为毫米波固态源在军事工程中的应用越来越广泛。如毫米波跟踪雷达，导弹寻的器，短程通信、测速、测距等都需要体积小，重量轻、分辨率高，对云雾、烟和灰尘穿透能力强的毫米波固态源。目前最活跃的是中心频率为 35GHz 的八毫米系统。原因是这个频率大气衰减小，各种八毫米器件易于得到，完全有条件搞配套工程。一个性能较佳的八毫米脉冲固态源涉及到器件，脉冲调制器和微波振荡电路三部分工作。只有当每一部分都能达到较高水平，才有可能做出一个较为满意的实用化的振荡器。我们在器件制造、脉冲调制器和微波振荡电路都进行了大量的研究工作，获得了较为满意的实用化的振荡器。目前振荡器的脉冲输出功率多在 20—40 瓦之间，重复频率可在 1—100kHz 之间任意选择，脉冲宽度可在 50ns—1μs 之间调节。在工程应用中以短脉冲体制为多，因而我们的研制工作是以研制短脉冲 IMPATT 振荡器为主。

二、脉冲 IMPATT 器件

对短脉冲八毫米 IMPATT 二极管，在器件设计中主要考虑二极管的阻抗限制。因为脉冲工作的 IMPATT 器件脉冲振荡器占空比都比较小，结温上升不会很高，从而脉冲条件下工作的电流密度可以大幅度地提高，甚至可以比连续工作时高一个数量级。这样大的瞬时工作电流密度使得在有源区中的瞬时空间电荷密度很高，这些载流子的空间电荷对漂移区的电场分布有着重要的调制作用，使得器件完全处于大信号的工作状态，因而在器件设计中应考虑载流子的空间电荷效应和扩散效应。器件大信号特性与电路的相互作用较为复杂，在毫米波频段难于精确地分析，所以我们的分析是以小信号分析为依据，以其作为一级近似，然后计人大信号情况下的载流子的空间电荷效应和扩散效应，设计出

器件的各个参数。

根据小信号理论, 器件的阻抗是^[1]:

$$Z = R_s + 1/\omega c_d \left[\frac{1}{1 - (\omega/\omega_r)^2} \left(\frac{1 - \cos \theta}{\theta} \right) \right] \\ + j \frac{1}{\omega c_d} \left[\frac{1}{1 - (\omega/\omega_r)^2} \left(\frac{\sin \theta}{\theta} - 1 \right) - \frac{W_A}{W_d} \left(\frac{1}{1 - (\omega/\omega_r)^2} \right) \right]$$

当工作频率 ω 比雪崩谐振频率 ω_r 高时, 则有负阻出现, 负阻 R 与渡越角 θ 的关系是:

$$-R \alpha (1 - \cos \theta) / \theta$$

从以上表示式可知, 器件的最大负阻出现在渡越角等于 0.74π 处, 对应的漂移区的宽度为 $0.37V_s/f$. 仅按以上小信号理论计算出来的器件参数, 掺杂浓度偏低, 漂移区电场的斜率也小, 宽度偏大, 实际的雪崩区的宽度加宽, 振荡器的效率低. 从而必须计入载流子的空间电荷效应和扩散效应, 对上式的结果进行修正. (具体计算从略). 当中心频率为 35GHz 时, 修正计算得出的最后器件参数是:

$$W_A = 0.2 - 0.25 \mu\text{m}$$

$$W_d = 0.8 \mu\text{m}$$

$$V_B = 25 - 30 \text{ V}$$

$$N_d = (2 - 3) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{管心直径: } D = 200 \mu\text{m}$$

工艺流程如下:

材料清洁处理 → 扩散 → 蒸发 Cr-Au → 合金 → 电镀 Au → 机械减薄 → 化学减薄 → 背面蒸发 → 合金 → 光刻 → Cr-Au 腐蚀 → 台面腐蚀 → 切片 → 直流检测 → 压焊 → 封帽.

减薄技术是器件制做中的关键工艺, 这可由输出功率与器件串联电阻的关系式中看出. 它们的关系为

$$P = \frac{1}{2} [|G| - R_s B^2] [(V_{ri})_{\max}]^{[2]}$$

可见要想获得高的输出功率, 必须尽量减小 R_s 的影响. 实际上 R_s 由三部分组成, 即欧姆接触电阻 R_c , 漂移区未耗尽层的电阻 R_d 和衬底被减薄后剩余部分的电阻 R_{sub} . 欧姆接触电阻取决于欧姆接触的制造工艺和所用材料, 合金温度等. 当设计合理时, 即在击穿的条件下是过穿通的, 就可以去掉漂移区未耗尽层的电阻 R_d 的影响. 关键是衬底剩余电阻的影响, 我们建立了机械减薄和化学减薄相结合的办法, 可把衬底控制在 $20 \mu\text{m}$ 以下.

台面腐蚀完后在半导体参数测试仪上观测二极管直流特性, 反向的饱和电流一般控制在 10 毫微安以下 (10^{-9} A). 我们制造的器件的典型结果

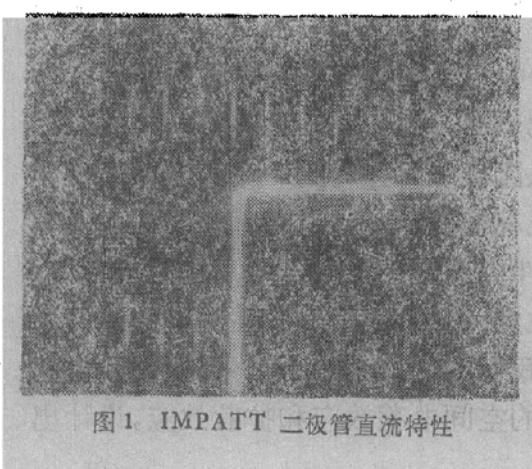


图 1 IMPATT 二极管直流特性

是 5×10^{-9} A。

典型的直流特性曲线如图 1 所示。

选用具有这样特性的二极管芯，切片压焊后可进行微波特性测量了。

三、脉冲调制器的研制

脉冲调制器是高稳定大功率脉冲振荡器的重要组成部分，它必须提供快速上升的电流脉冲并要有 10 安培左右的脉冲电流并且跳动很小，还要有恒流作用。在许多应用中要求前后沿不得超过 10ns，脉冲宽度和重复频率都能在较宽的范围内调节。例如脉冲宽度在 50ns 到 1μs 和重复频率在 (1—50)KHz 之间可调。我们研制定型后的调制器是属于恒流脉冲源。其框图如下：

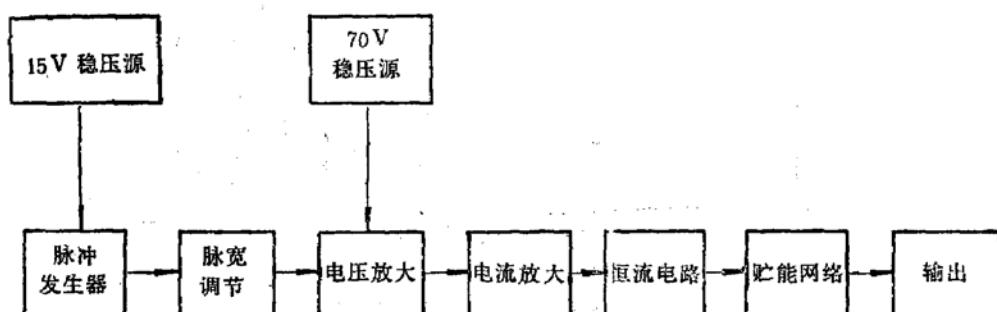


图 2 大电流脉冲调制器框图

实验中发现调制器的输出电缆线的长短对输出脉冲波形有很大影响，甚至 20cm 一段线就可使检波包络的基线发生畸变。典型的检波包络如图 3(a) 所示*。为了改善输出脉冲的波形，尽可能减小调制器输出电缆线的影响，我们采取背负的办法，把振荡腔装在调制器的盖上，如图 3(b) 所示，这样就解决了输出电缆线的影响问题。

四、微波振荡电路

在振荡器的研制过程中，我们先后设计了三种不同结构的电路。第一种是采用减高波导端接一高 Q 稳频腔的结构，利用高 Q 腔来提高频率稳定度和降低振荡器的噪声，为了提高稳频腔的 Q 值，采用了 H_{013} 模式，因为 IMPATT 器件是一种低阻抗器件，为了使器件和输出电路之间获得较好的阻抗匹配，我们设计了谐振帽结构，谐振帽的半径近似 $\lambda/4$ ，这个谐振帽和下波导壁组成一个径向线谐振腔，调节谐振帽在波导中的高度，可改变振荡器的频率。另一方面又构成了一个阻抗变换器，解决了器件到输出电路之间的阻抗匹配问题。

为了减小振荡器的体积和减轻重量，我们又设计了另外两种振荡腔，其腔长都是 $\lambda g/2$ ，侧面加脉冲偏置。一种上方有调节棒，通过调节可改善脉冲输出波形，其外形如图

* 图 3(a), (b) 见图版 1.

4(a) 和 4(b) 所示*。

五、振荡器的特性

微波测量系统的框图如图 5 所示，在这个系统中用双线示波器同时观测调制器的输出电流脉冲波形和振荡器输出脉冲的检波包络图形。通过第二个定向耦合器和一个衰减器到频谱仪，用以观测振荡器的频谱。表 1 给出几个振荡器的典型结果。

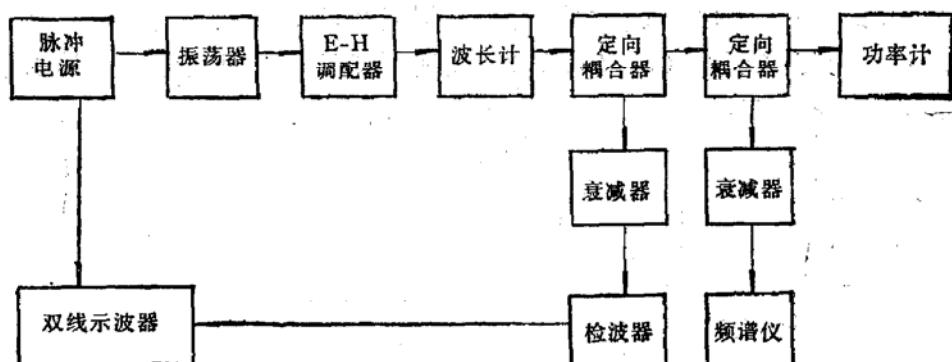


图 5 微波测试系统方框图

表 1 脉冲 IMPATT 振荡器的典型结果

序号	工作电压 (V)	工作电流 (A)	振荡频率 (GHz)	输出功率 (W)	效 率 (%)
1	33	11.7	35.5	33	8.5
2	35	12.0	34.0	41.8	9.75
3	35	10.0	36.0	26	7.4
4	39	12.5	35.5	48	9.8

从实验中看到输出脉冲的检波包络与调制器输出的偏置脉冲之间有一定的时间延迟。所有的振荡器都存在这个延迟，这是一个普遍的现象。一般来说这种延迟从几十 ns 到一百 ns 不等，典型的结果示于图 6**。这种延迟的原因是器件中雪崩倍增产生的载流子与射频电压之间以及外电路形成输出脉冲之间所需时间造成的。在实际的工程应用中要根据使用要求对此种现象做出具体处理。

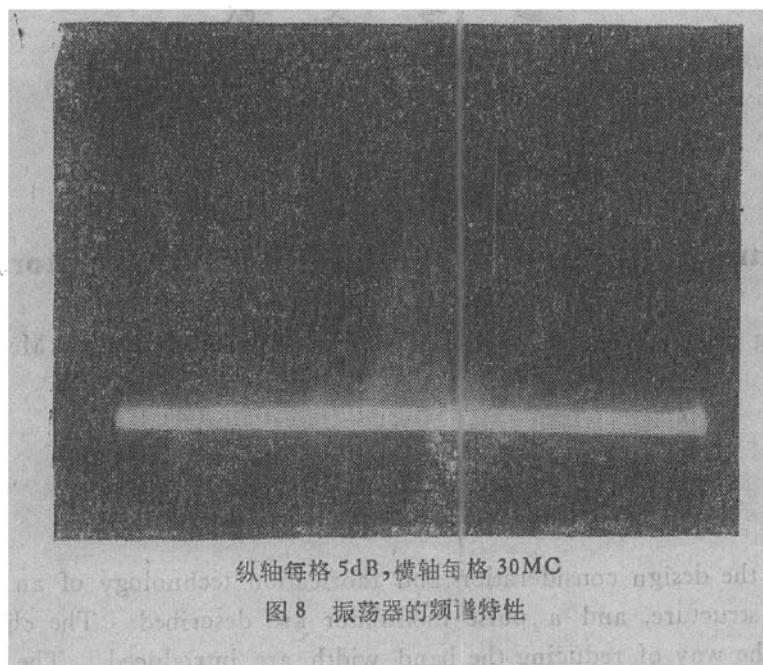
实验中还发现，在加大偏置脉冲时输出脉冲包络顶端出现分叉现象，如图 7 所示**。一旦出现这种现象，再增加调制器输出电压，输出功率不但不增加反而出现下降现象，再加电压管子有被烧毁的可能性。出现这种现象的原因是调制器给不出再大的电流所致。如果进一步改善调制器供给脉冲电流的能力，振荡器的输出功率仍会增加。

振荡器的频谱特性也是振荡器好坏的一个很重要的标志，脉冲工作体制与连续波的

* 图 4(a),(b) 见图版 I。

** 图 6,7 见图版 I。

不同，频谱一般较宽而且有旁瓣。在使用时要求主瓣比旁瓣高 10dB 左右。我们研制的频谱特性如图 8 所示。



脉冲工作的 IMPATT 振荡器噪声预计比连续波工作的要高，原因是脉冲工作状态有频调效应存在。因为在脉冲偏置期间，器件结温上升导致器件阻抗发生变化，最终结果是振荡频率发生变化。结温升的越高，调制频移带宽越宽，结温上升的越快，调制频移速率越高。对于平的电流脉冲，调制频移效应是使振荡频率下降。向上斜的电流脉冲，随着偏流的增加振荡频率上升，如果适当设计偏置脉冲电流的波形，可以使结温升高引起的频率下降与增加电流脉冲的斜率而引起的频率的增加相互抵消。如图 9 所示。当然要做出使调制频移效应刚好消失的偏置电流脉冲是很困难的。我们研制的调制器输出电流脉冲有一定的向上倾斜度，对频调效应还是有一定改进作用的。

六、结束语

我们研制的 8 毫米 IMPATT 脉冲二极管及振荡器获得了较为满意的结果。最高的输出功率已超过 48 瓦，并已实用化和具备了批量生产的能力。

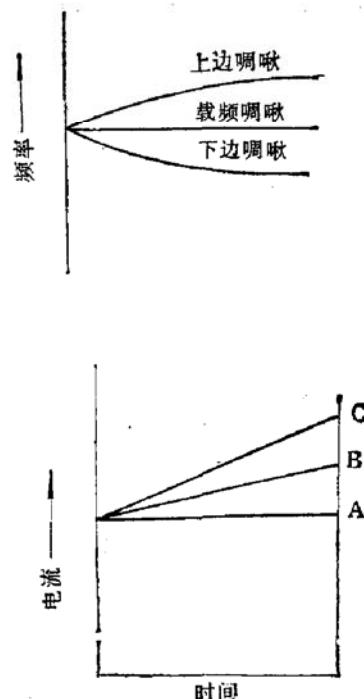


图 9 频调特性示意图

从技术角度来看调制器仍有潜力可挖。输出功率还可以提高。调制频移效应还可以进一步改善。

参 考 文 献

- [1] W. T. Read, *Bell. Syst. Tech. J.*, **37**, 401 (1958).
- [2] M. G. Adlerstein and S. L. G. Chu, *IEEE MTT-S, DIGEST*, (1984), 481—482.

8mm Pulse High Power IMPATT Oscillators

Yang Yufen, Zhang Huanghe, Wang Baoqiang, Hou Menghuei,
Wu Xiaodong and Peng Bin

Institute of Semiconductors, Academia Sinica

Abstract

In this paper, the design consideration and fabrication technology of an IMPATT diode, microwave circuit structure, and a pulse modulator are described. The chirp effect during pulse biasing and the way of reducing the band width are introduced. The output power of the 8 mm pulse IMPATT oscillators is over 20 W at frequency range of 34—36 GHz with repetition rate from 1 kHz to 100 kHz. The pulse width is from 50 ns to 1 μ s. The frequency is stable and the reliability is high. The highest output power measured is 48 W at 35.5 GHz.

Key words Oscillator, Millimeter wave solid state source, Modulator