

雪崩晶體管振蕩電路的實驗研究

譚學良 蘇浩松 馮鎮業

(物理系)

摘要

本文討論了雪崩晶體管掃描發生器的電路參數對鋸齒波形的影響。採用自舉電路來提高掃描綫性度。實驗結果與計算相符合。文中還研究了雪崩晶體管正弦振蕩器，實驗結果表明，工作在雪崩型式的某些振蕩性能要比在正常型式的好。

一 引言

晶體管中 $p-n$ 結的雪崩擊穿現象早在1955年就發現了^[1]。1958年有人將之應用於毫微秒脈沖電路^[2]。此後，雪崩管的脈沖電路以其大幅度和快速上升的特殊優點而得到迅速的發展。在此期間，這些電路工作大都集中在窄脈沖的產生方面，對於掃描電路，一直都研究得很少。其中較為成熟的，是在固定偏流下工作的^[3]。這就給供電系統增加麻煩。另一方面，雪崩過程所引起的存儲現象，常使鋸齒波形在掃描期後出現一段平底。因之，要使電路較為完善地付諸應用，就必需作進一步的改善。

我們認為，雪崩管作為一個負阻器件，除應用在脈沖方面外，是有其更廣泛的用途的。本文初步探討了雪崩管用於正弦振蕩的可能性。研究結果表明，晶體管在雪崩區運用時所作的正弦振蕩要比在正常區運用時好。諸如振蕩波形，振蕩頻率的穩定性等。這些優點在環境溫度稍高時尤為顯著。

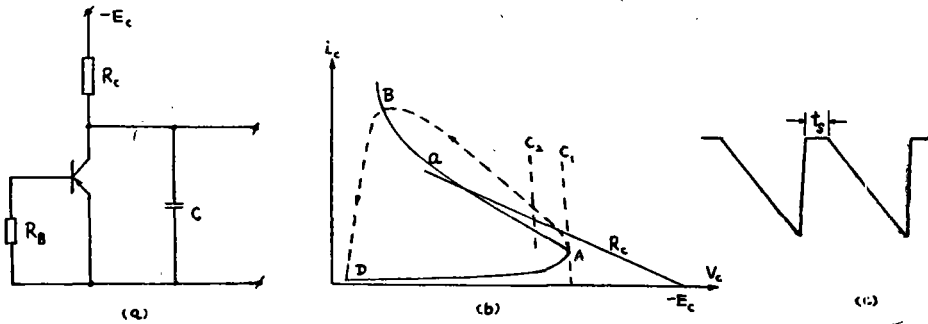
二 雪崩晶體管掃描電路

(1) 電路參量對鋸齒波的影響。

本文研究的鋸齒波電路如圖(1)。電路的工作行程簡如圖(1b)。其中 α 是

本文於1965年10月23日收到。

管子定阻 R_B 状态下的雪崩静态特性, R_C 和 C 分别是直流和交流负载线。在管子雪崩期间, 电容端电压下降, 交流负载线随之往左移, 如图的 C_1 到 C_2 等等。相应的工



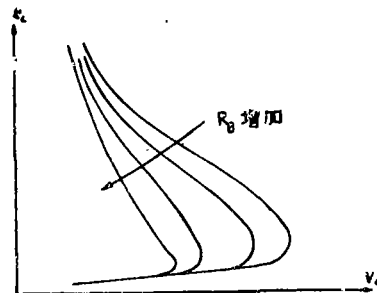
图一

作点则由 A 到 B 。由于存储效应, 到达 B 点之后, 工作行程不是垂直往下, 而是沿图的虚线 BD 进行⁽⁴⁾。实验表明, 从 A 到 B 的时间是极为短暂的, 一般在几十毫微秒便告完成, 相应的输出波形示在图 (1c) 图中出现的平底时间 t_s 是与上述 BD 的历程相对应, 这个时间的久暂视基区存储电荷量及外电路电阻 R_B 的大小而定。表 (I) 列出了两个管子的 t_s 与 R_B 的实验关系。从表列结果可见, 要缩减锯齿波的平底时间 t_s , 可以取较大的或较小的 R_B 值。

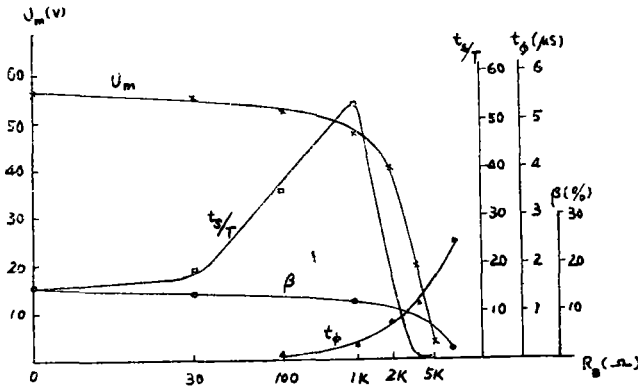
表 (I) 平底时间 t_s 与电阻 R_B 的实验关系。

2N404	$R_B(\Omega)$	0	30	200	1K	1.5K	2K	3.5K	5K	7K
	$t_s(\mu S)$	0.8	0.9	1.5	2	1.4	0.4	0	0	0
OC44	$R_B(\Omega)$	0	30	200	1K	1.5K	2K	3.5K	5K	7K
	$t_s(\mu S)$	0.4	0.6	1.6	2	2.2	2.4	2.6	0.4	0

1961年 S. C. Ryder 等人研究了外电路电阻 R_B 对雪崩特性的影响⁽⁵⁾。选用不同的 R_B 值, 就可得不同的雪崩特性 (图二)。从图可见, 对于较大的 R_B 值, 雪崩电压是较低的。因而相应的锯齿波幅度就比较小, 并且扫描期也较短。故当 R_B 值变化时, 不仅使上述平底时间改变, 同时锯齿波的其他参量也会跟着改变。我们作出了 R_B 与锯齿波诸参量的实验关系 (图三)。从图可见, 为了兼顾振幅, 前沿与平底时间, 选用较小的 R_B 值是适宜的。



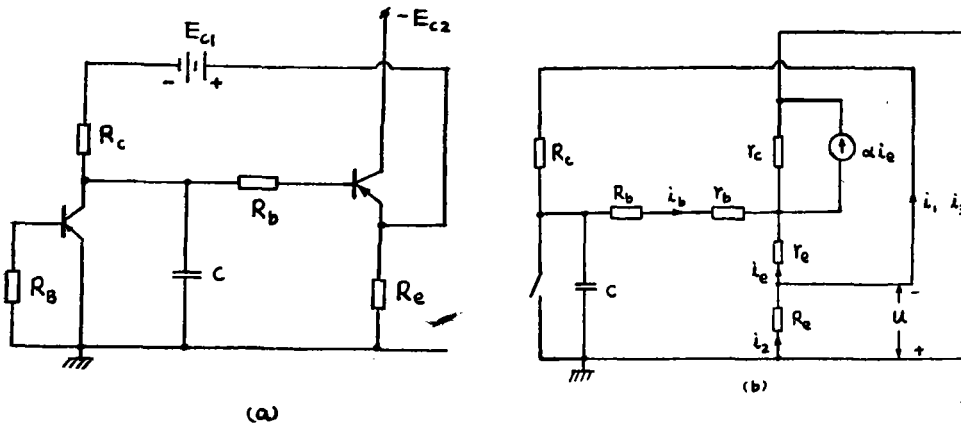
图二



图三

(2) 雪崩晶体管扫描电路的线性补偿

和通常开关型的扫描电路相仿，当重复频率降低时，锯齿波便出现非线性偏离。实验表明，为了缩减平底时间而用较小的 R_B 时，非线性偏离就更为严重。为此，我们引用了电子管的自举补偿方法（图4a）。相应的等效电路示于图（4b）。



图四 线性补偿电路

从图(4b)可得如下方程组:

$$\begin{cases}
 \frac{1}{C} \int i_o dt + i_2 R_e + i_e r_e - i_b (r_b + R_b) = 0 \\
 i_2 R_e + i_e r_e + (i_3 - \alpha i_e) r_c = 0 \\
 i_1 R_e + i_b (r_b + R_b) - i_e r_e + E_{o1} = 0 \\
 i_2 - i_1 - i_e = 0 \\
 i_e + i_b - i_3 = 0 \\
 i_o + i_3 - i_2 = 0 \\
 u = i_2 R_e
 \end{cases} \quad (1)$$

假设 $R_c \gg r_e$, $r_o \gg r_e$ 并且 $\alpha \approx 1$, 则由上述方程组可得,

$$A \frac{du}{dt} + \frac{1}{CR} u - \frac{1}{CK_e} E_{c1} = 0 \quad (2)$$

式中

$$A \approx 1 + \frac{r_e}{R_e} + \frac{R_b + r_b}{r_e}$$

$$R \approx \frac{r_o R_c}{R_c + R_b + r_b}$$

解式(2)得,

$$u(t) = \frac{RE_{c1}}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{t}{ACR}} \right) \quad (3)$$

如果雪崩电压为 V_B , 则由式(3)求得的扫描期 T 为:

$$T = ACRLn \frac{\frac{R}{R_c} E_{c1}}{\frac{R}{R_c} E_{c1} - V_B} \quad (4)$$

根据非线性系数的定义, 由式(3)又可求得电路补偿后的非线性系数 β :

$$\beta = \left(\frac{R_c + r_b + R_b}{r_o} \right) \beta_o \quad (5)$$

其中 β_o 为补偿前的非线性系数。

我们用 OC47 作为雪崩管, OC80 作为补偿管, 按图(四)进行了非线性系数的测量。所得结果如表(II)所示。其中 β 的计算值是按式(5)进行的。

表(II)

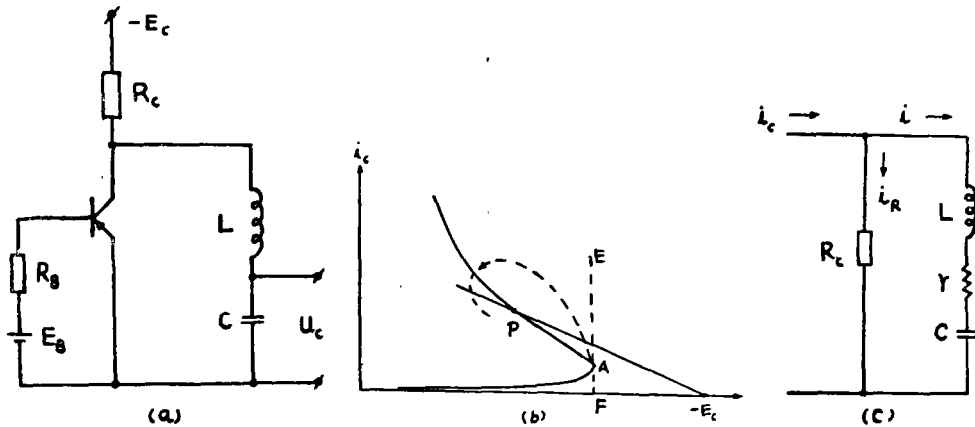
重复频率(赫)	50	200	300	400	1000	5000
$\beta_o(\%)$	23	20	14.7	12.8	8.8	6.7
$\beta_{实}(\%)$	12.1	5	3.4	1	0.5	<0.5
$\beta_{计}(\%)$	9.7	5.6	3	2	0.4	0.24

从表列实验值可见, 补偿后的非线性系数比起补偿前有了进一步的改善, 与计算值比较还是相当符合的。

三 雪崩晶体管正弦振荡器

在图(一)的基础上加上电感, 便构成我们所考虑的正弦振荡器(图五)。电

路的工作行程簡示在圖(5b)。當比值 L/C 足夠大時,就可使工作狀態到達A點時不會出現過大的躍變。因為在負阻區內,流過電阻 R_c 上的電流 i_R 改變不大,管中電流



圖五

i_o 的任何變化主要由電容 C 的放電來補償,由於電感的存在,放電電流就不能突變。結果,交流負載綫 EF 只能移往 i_o 不很大並且 V_o 不很小的地方(如圖中的 B 點)。由於這個過程較為緩慢,而電流變化又不大,存儲效應就不甚顯著。這就使得工作行程與上述的開關狀態不同,工作點不會跳出負阻區。上述的工作點 B 是不穩定的,因為這時候的電流 $i_o > i_R$,電容 C 仍處於放電狀態,放電強度則較前減弱,以致工作點有下降趨勢,但考慮到電感的作用,管的端電壓實際是上升的,結果工作區域可能縮減至全部落在負阻區域,成為負阻振蕩。

(1) 振蕩頻率及穩定振幅。

如果電路是在負阻區工作,在工作點 p 附近,管子的雪崩特性(圖二)可近似表示為,

$$u = a_0 + a_1 i + a_3 i^3 \tag{6}$$

則由等效電路圖(5c),可得,

$$i_c = i + i_R \tag{7}$$

$$u = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + i r \tag{8}$$

考慮到 LC 的串聯諧振阻抗甚小,亦即 $i_R \ll i$,則由式(6)(7)及(8)可得如下的非線性方程:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left(\frac{r - a_1 - 3a_3 i^2}{L} \right) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0 \tag{9}$$

解之得振荡频率 ω ,

$$\omega = \left[1 - \frac{C}{16L} (r - a_1)^2 \right] \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

以及电容端电压的振幅 U_{cm} ,

$$U_{cm} = 2 \sqrt{\frac{(a_1 - r)L}{3a_3 C}} \quad (11)$$

我們取OC44管子工作在雪崩状态,按图(五)的电路进行频率及振幅的测量。实验测得的管子参数 $a_1 = -363\Omega$, $a_3 = 14.5\Omega/\text{mA}^2$, 取 $R_0 = 6.5k\Omega$, $R_B = 30\Omega$, $E_0 = 67V$, $E_B = 1.5V$ 。所得结果列于表(III)。表中的计算值是分别按式(10)及(11)进行。

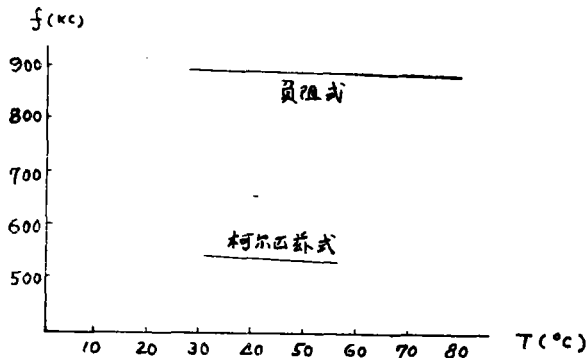
表 III 振荡频率及稳定振幅

电感L(μh)		25			250			25000		
电阻r(Ω)		0.5			7			100		
电容C(pf)		16	40	100	16	100	300	390	1000	2900
振 荡 频 率	实验值(KC)	3200	2700	2000	1260	810	510	50	30	19
	计算值(KC)	5000	3900	2800	1590	900	550	49	33	18.7
相对误差(%)		36	30.8	28.6	20.7	10	7.3	2	9.1	1.6
稳 定 振 幅	实验值(伏)	2.5	2.4	2.0	8.3	5.2	3.5	20	14	9
	计算值(伏)	4.4	2.8	1.8	14	5.6	3.2	28	18	10
	相对误差(%)	43	14	10	40	7.2	9.5	28	22	10

从表列数值可见,振荡频率的实验值与按式(10)所得的计算值并不是在各种电路参数下都是很好地符合的。总的说来,在电感值较大时符合得较好,而在电感值较小时,则误差较大。我们认为,误差的主要原因是上述分析模型不够完善所引起,例如在雪崩状态下会出现的电感效应就没有考虑^[6]。振幅的误差原因主要有两方面:第一,由于管子的非线性,当幅度较大时,式(11)中的 a 值就不能准确定出,而只能取工作范围内的平均值代替;第二是和频率的误差原因一样,在利用式(11)计算振幅时,也没有考虑到雪崩状态下的等效电感。因此,表列的振幅数据只在振幅不很大,而电感又不甚小的情形下,理论值才较好地与实验值相符。这是有待今后作进一步修正的。

(2) 溫度變化對頻率穩定性的影響。

從式(10)可見，振蕩頻率決定於各有關參量之值。如果溫度變化就必然導致頻率的变化，其中管子的特性斜率 α_1 受溫度的影響尤甚。這裡值得提出的是，晶體管在正常區運用時，受溫度的影響也是相當嚴重的，過去已有不少作者研究過。我們試圖比較一下，在正常區運用的晶體管振蕩器和在雪崩區運用的晶體管振蕩器，其頻率穩定度何者較高。



圖六

圖(六)示出了用同一管子所作的兩種振蕩器的實驗結果。其中正常運用的一種是按電容三端電路接成的。在 32°C — 60°C 的溫度範圍內，其頻率穩定度為 4.5×10^{-4} /度；在 60°C 以上時，振蕩波形顯著變壞，繼而振蕩停止。在雪崩區運用的振蕩器，則在 27°C — 80°C 的溫度範圍內，均工作得很好，波形也較佳，其頻率穩定度為 -1.45×10^{-4} /度，這比正常運用的有一定的改善。

從上可見，雪崩區運用的晶體管正弦振蕩器是具有一定特點的，尤其是在稍高的溫度範圍，它的優點就更為突出。

參 考 文 獻

- [1] S. L. Miller, "Alloyed Junction Avalanche Transistors", B. S. T. J., 1955, pp. 883.
- [2] Conference on Solid—State Circuits. 1958.
- [3] PIRE 1959 June pp. 1102—1108.
- [4] 1964 無線電快報第15期。
- [5] S. C. Ryder—Smith; "Voltage Breakdown of Trausistors" Electronic technology, 1961, pp 348.
- [6] 固體電路電感元件，1961年半導體快報。

An Experimental Study of Avalanche Transistor Oscillatory Circuits

Tan Hsueh—liang, Su Ho—sung and Fong Tsun—yee

Abstract

The effect of circuit parameters of avalanche transistor sweep generators on the sawtooth waveforms is discussed. To improve the sweep linearity, the bootstrap circuit is applied. It is shown that the calculated results are in agreement with experimental data. The avalanche transistor sine wave oscillators are also studied. Experimental results show that a certain performance of oscillators operated in avalanche mode is found to be better than that of oscillators operated in normal mode.