

电子学报

增刊

电子线路

(内部资料)

1965

中国电子学会編輯
科学出版社出版

电子学报 增刊

电子线路

中国电子学会编辑

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可登记证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行

*

1965年3月第一版 开本：787×1092 1/16

1965年3月第一次印刷 印张：4 5/8

印数：0001—1,200 字数：108,000

统一书号：15031·188

本社书号：3197·15—10

定价：[科七] 0.70元

电 子 学 报

增 刊

电 子 纜 路

目 录

- 超短脉冲技术的发展…………… 陈芳允 蔡德学 余英林 郭庆勳 陈賚云 (1)
- 晶体管器件理論与綫性电路理論的进展…………… 成众志 黄 敏 (31)
- 信息網絡理論…………… 陆志刚 (64)

編 者 的 話

为了庆祝中华人民共和国成立十五周年,在各有关专业委员会、各有关单位的关心和支持下,在作者的努力协同下,我們編輯了这套“增刊”。其内容主要綜述电子学各分支学科的国际国内研究近况及其发展趋势,作者也提出了自己的見解。这些綜述評論文章所涉及的材料比較丰富全面而新穎,可供科研、生产、教学等部門工作的同志参考。

为了方便讀者,我們按专业的内容分为 11 个分册,包括:信息論、量子电子学、微波理論与技术、天綫电波、电子纜路、参量放大器、电真空器件、通訊、无线电导航、超声、化学与物理电源等。由科学出版社出版,内部发行。

由于水平和時間所限,錯誤难免,敬希讀者批評指正。

电子学报編輯委员会

1964 年 10 月

超短脉冲技术的发展

陈芳允 蔡德孚 余英林 郭慶勳 陈賚云

提 要

本文主要总结国际和国内超短脉冲基本线路技术的发展。

文章分放大、产生、传输和显示等四个主要方面进行综述和评论。放大器方面着重于分布放大。在这一问题上我国已进行了一些频宽扩展和理论计算的工作，可以解决频宽约 300 兆赫的分布放大器。产生器方面着重于二次发射管脉冲产生器和新型的半导体器件脉冲产生器等。我国在利用晶体管产生毫微秒级脉冲方面已有一定成绩。传输方面着重于带状结构传输线在超短脉冲传输中的应用。我国已研究出适于实验室工作的一些带状结构传输部件，频宽达 2000—3000 兆赫。显示方面着重于取样设备，在这一问题上我国已进行了一系列理论和实际工作，对取样显示设备的频宽、过渡特性及信噪比的提高作了较详细的研究。还已经研制出几种可用的取样示波器，包括差频式的、触发式的和晶体管的，它们已在一些实验室中应用。取样头的频宽最高已达 2000 兆赫以上，系利用带状结构制成。

文章最后提出了一些今后的研究方向和新的应用的可能性。

一、緒 論

超短脉冲技术是脉冲技术中一个较新的分支，也是脉冲技术新发展的一个主要方向。它包括产生宽度短于数十毫微秒($\tau < 10^{-8}$ 秒)的脉冲以及对时间如此短促的脉冲或其他瞬变现象进行放大、传输、显示和各种转换的技术。目前国际上的情况是： 10^{-8} 秒量级的技术已经稳固， 10^{-9} 秒量级的技术已经掌握得比较好，而 10^{-10} 秒量级的技术则正在逐步开展起来，个别工作还达到了更短的量级。

我们知道，各项现代尖端技术的发展日益要求无线电电子学朝着远距离，快速，精密，高可靠和小型化等方向发展。超短脉冲技术则主要以解决快速和精密两项为目的。它应用于快速和多路的信息传递，快速计算和控制，高鉴别率探测，极短瞬变过程的测量和观察以及其他的精密测量。最先使用超短脉冲技术的是瞬间电现象的观察，例如高压击穿现象的观察^[1]。毫微秒脉冲线路技术则首先在高鉴别率雷达工作中得到发展，这种雷达中所应用的脉冲短至 20—50 毫微秒^[2,3]。在原子核物理研究中毫微秒和更短的脉冲的线路和设备应用得更广泛，它们主要地被用来探测快速的核反应过程和测量基本粒子的飞越速度，在这一领域中 10^{-10} 秒量级的技术已不罕见^[4,5]。在通信编码通信和高速电子计算机中则由于码重复频率的提高而非缩短脉冲宽度不行，例如波通信编码设备中所用的码重复频率高达 160 兆赫^[6]，实验中的超高速计算单元的脉冲重复频率达数百甚至上千兆赫^[7,8]，在这样高的重复频率下脉冲的宽度必然很窄。在测量技术方面，特别是精密

時間測量以及各種新型快速電子和固體器件特性的測量，對超短脈沖技術的需要也日益增加，例如核子物理研究中常需要測量數十微秒或更長的時間間隔而精度則達數個毫微秒^[9]，新型高速電子器件和半導體器件開關特性的測量也要求能觀察和記錄次毫微秒，甚至更短的時間。

超短脈沖包含特寬頻帶的頻率分量，從較低頻到數千、數萬兆赫甚至更高的頻率，因此處理超短脈沖的器件和線路亦必須能通過或適應如此寬的頻帶。由於頻帶中包含了低頻成分，故許多應用於超高頻但卻系窄頻帶的器件便不能應用；諧振迴路的应用亦不普遍。由於頻帶深入到超高頻甚至微波波段，故必須考慮到雜散和分布參量的影響，必要時（如超短脈沖在傳輸線中的過程）應直接應用場的概念來解決問題；在電子器件中則還應考慮到電子渡越時間的影響。這些考慮常使線路的理論計算和設計趨於複雜化。由於包括超高頻和超短時間關係問題，在實驗技術上也引起了許多困難。頻率較高時的電磁感應和輻射現象以及由此引起的干擾和反饋等情況比較嚴重是眾所周知的。同時，線路中的干擾和噪聲（包括電源的不穩定因素）常常會引起時間關係上的不穩定現象（例如觸發時間幌動，時延幌動，重復頻率不穩定等等），它們在較寬脈沖工作時本來並不顯著，但相對於超短脈沖寬度，所處理的超短時間和所要解決的特高精度來說，就會產生不能容許的壞影響。由於這些原因，可靠、穩定的超短脈沖測試設備的製作也是不簡單的。因此，它們的研制和基本線路問題一樣，受到大家的重視。

本文的目的是簡要地總結超短脈沖基本線路中幾個重要方面的近期發展情況。它們主要是：放大、產生、傳輸和顯示。較早的發展在 Lewis 和 Wells^[4] 的專著中已有十分詳細的總結，在非必要時我們不作多餘的重復。我們還希望能指出這些方面所存在的重大科學問題和研究方向。對於超短脈沖線路中的電子器件和元件問題，本文不想作全面的總結，但必須指出，和其他電子線路工作一樣，適用的器件和元件的解決和新發展是做好超短脈沖線路工作和開辟新課題、新應用的關鍵。本文將談到一些電子器件對於超短脈沖線路工作所起的特殊作用。

二、超短脈沖的放大

放大器在超短脈沖技術中可以說是進展得較慢的一個基本問題。

對於數十毫微秒寬度的脈沖的放大，一般電子管和晶體管的補償放大器或利用低通網絡作為級間耦合的放大器^[10] 已可達到要求。利用高跨導電子管，這類放大器的通頻帶可達 50 兆赫以上，甚至 100 兆赫。此種放大器過渡過程的升起時間可短至數毫微秒。製作高增益寬頻帶補償型放大器時，管數增多，調整的困難程度亦將增加。事實上，從用管數目是否經濟來說，50 到 100 兆赫已是補償放大和分布放大的競爭區域^[11,12]，通帶 100 兆赫以上時，則以採用分布放大為宜。

對於放大毫微秒級脈沖，以及帶寬達數百兆赫的信號，仍然以 Ginzton 等^[13] 在 1948 年提出的寬帶分布放大器為較好，應用亦較普遍。典型的分布放大級線路見圖(1)。利用現有電子管製作的實用分布放大器帶寬大多在 400 兆赫以下。文獻 [4] 中提到的分布放大器和文獻 [14] 中列舉的一批工業生產的分布放大器可資參考。

較寬頻帶分布放大器的分析和通頻帶的限制是一個重要的問題。它的通頻帶主要系受到電子管內部雜散參量和電子渡越時間的限制。在較高頻率時影響分布放大工作的因

素經 Horton 等^[15] 和 Weber^[16] 初步討論后, 很少人再進行深入的研究。有人制作了頻帶較寬的分布放大器, 例如 360 兆赫^[17] 和 400 兆赫^[18] 等, 但他們在理論上沒有分析, 而且所達到的增益都是很低的。1960 年 Declaris 与 Dalman^[19] 對高頻限制問題重新進行了討論并提出了改進应用于分布放大的電子管的一些建議。他們利用陶瓷盤封三極管 (GE-7077) 制出了通頻帶 660 兆赫的分布放大級, 所得到的增益為 15 分貝。

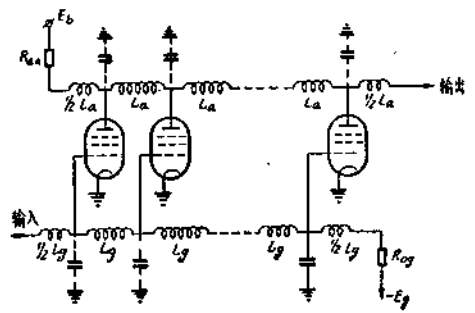


圖 1 分布放大原理圖

1962 年陳芳允、方澄等^[20] 較詳細地討論了工作頻率接近于放大管內雜散參量諧振頻率時管的輸入輸出等效電路, 分析了它們對於分布放大器高頻頻段工作的影響, 并提出了考慮這些影響在內的較寬頻帶和較高增益的分布放大器的設計方法。他們指出: 柵極輸入電路應包括柵-陰電容, 陰極引線電感, 陰極和燈絲間電容以及柵極引線電感 (圖 2)。當工作頻率接近于柵陰電路的諧振頻率時, 有效的柵極輸入電容 (C_{ic}) 增長很快 (圖 3), 遠較低頻時的輸入電容 (C_{i0}) 為大。由於較寬頻帶分布放大級中柵極傳輸綫并聯的電容都直接利用電子管的輸入電容, 上述情況使柵極傳輸綫的有效截止頻率 (f_{ce}) 較原設計的截止頻率 (f_{c0}) 降低很多, 而且影響傳輸特性。若柵綫電感是按公式

$$f_{c0} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_k C_{i0}/m}}$$

設計的, 則柵綫的有效截止頻率將為:

$$f_{ce} = \frac{1}{\pi \sqrt{\frac{m}{\pi^2 f_{c0}^2 C_{i0}} \cdot \frac{C_{ic}}{m}}} = f_{c0} \sqrt{\frac{C_{i0}}{C_{ic}}}$$

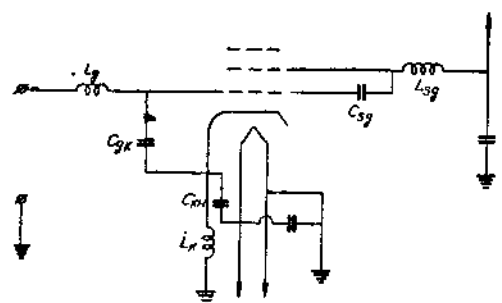


圖 2 柵極輸入電路

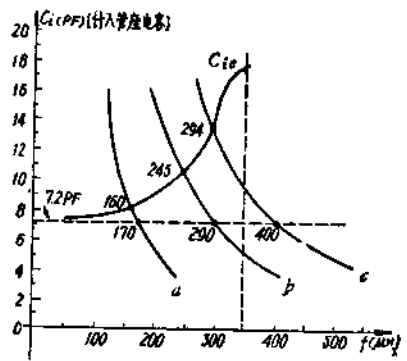


圖 3 有效輸入電容隨頻率變化曲綫和有效截止頻率的求得

圖 3 中 a, b, c 各綫表示截止頻率隨電容變化的曲綫, 它們和實綫的交點即為實際上能得到的有效截止頻率。以 6J1(6Ж1П) 管為例, 採取 $m=1.27$, 選原設計截止頻率為 170, 290 和 400 兆赫, 得有效截止頻率為 160, 245 和 294 兆赫。工作頻寬提高時影響傳輸綫特性

的另一因素是电子管的输入电导。根据作者的计算,由于引线电感和阴极-灯丝电容的存在,输入电导随频率的增加较一般估计的要大得多(也就是有效输入阻抗要低得多,见图4)。

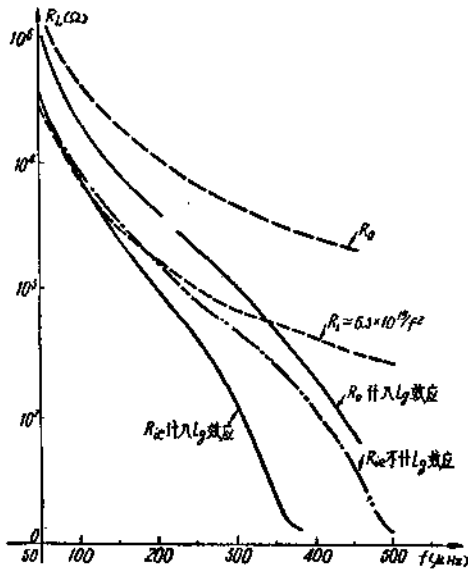


图4 6J1 (6Ж1П) 管有效输入电阻随频率变化的计算和实验曲线

这是管数较多的分布放大级高频特性下降的主要因素。作者指出,由于上面两种原因,利用6J1管制作较高增益的分布放大器很难超过300兆赫的频率。Daclaris和Dalman在文献[19]中曾指出用6AK5管制作分布放大级难于超过400兆赫,他们对该管栅阴电路谐振点的测量似未包括接线电容,而且也没有充分估计高频衰减问题以及高增益放大器的困难。陈芳允、方澄等考虑了输入电容变化和高频衰减问题,提出了一套设计方法并以一个增益10余倍的300兆赫带宽放大器作为实例,实验结果可大致说明理论分析的正确性。

此后(1963年)陈芳允等^[2]提出了利用 mm' 导出式低通网络(图5(a))作为栅极和板极传输线来制作较宽频带的分布放大级(图5(b))。当 m 和 m' 选择适当时,这种网络能够吸收电子管的大部分杂散参量,故可使放大

此后(1963年)陈芳允等^[2]提出了利用

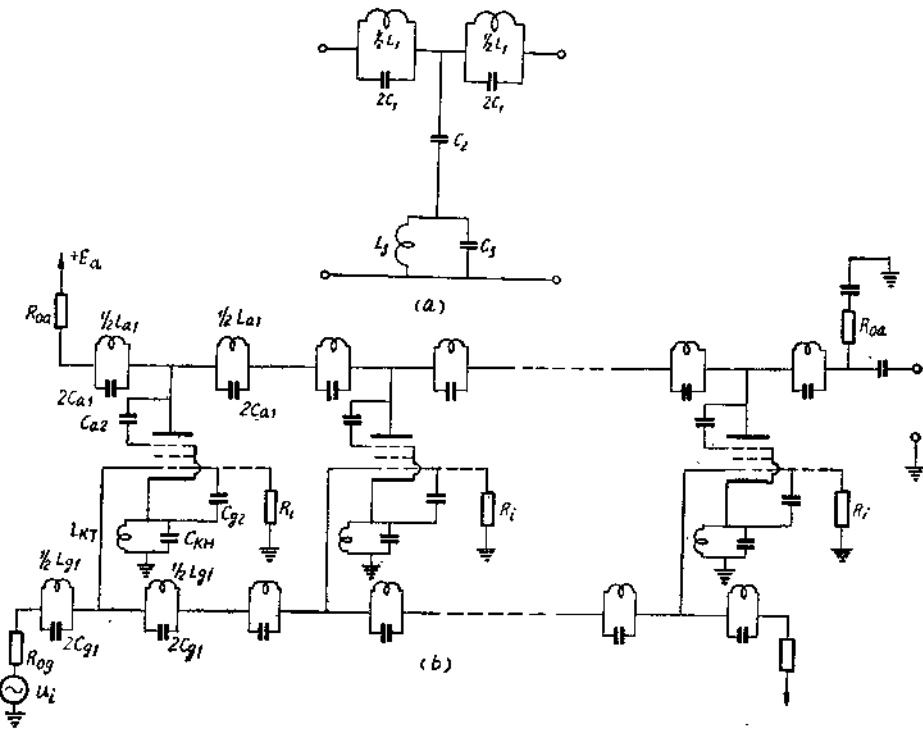


图5

(a) mm' 导出式低通网络; (b) mm' 导出式低通分布放大器

級的有效截止頻率符合于原設計的截止頻率。為了避免電路中出現負電容，作者所選擇的 m 和 m' 都是略小於 1 的數值。此時網絡的時延特性雖較常 K 式網絡的為壞，但接入線路後，由於電子管的高頻衰耗，放大級的增益和時延特性卻可被拉平而得到較好的結果。作者分別作了 200 兆赫和 300 兆赫 mm' 導出式放大級的實驗，其实际的和設計的截止頻率十分符合。利用這種放大級，可以在一定程度上簡化程序，較準確地設計較寬頻帶的分布放大器。

應用網絡綜合法設計分布放大器的概念是 Pettit 和 Pederson^[22] 於 1952 年首先提出的。他們建議以雙管分布放大單元(圖 6)作為組成放大器的基礎。柵綫和板綫均採用 LC 梯形網絡，而以 Butterworth 函數來逼近最平的幅-頻特性。採取兩管作為單元的原因是使電路方程的階數不致於太高，計算不致於太繁。Declaris^[23] 於 1960 年提出了較完善的計算方法並借助於電子計算機算出了可供三、四和五管用的柵綫和板綫的參數。他採取使柵綫和板綫具有不同的截止頻率的方法來控制網絡傳輸係數以接近最平的幅頻特性。這樣做法顯然是有局限性的。Koch^[24] 利用切比雪夫逼近法設計分布放大器並進行了頻寬 300 兆赫的兩管綫路放大級的實驗。他聲稱：在同樣的通頻帶下，綜合法得到的增益比一般利用常 K 式網絡制作的放大級可增大至 1.84 倍。這種結果是令人鼓舞的，但應指出，計算是十分繁復的，而且作者在文中雖然討論了電子管的超高頻影響，但卻沒有在設計中把這些影響考慮進去。1964 年李路得^[25] 在 Pettit 工作的基礎上提出了增加零根校正級的方法以縮短綜合法設計的復演過程。他的綫路見圖 7。開始時採用和 Pettit 相同的方法，即預給主放大級的柵、板兩綫的特性阻抗以某一要求的函數 (Butterworth 函數)，定出兩綫的電路參量，從此可知增益函數中的有害零根，然後進一步設計校正級校正網絡 N ，利用該級增益函數中的極根以抵消主放大級零根的有害作用。這樣主放大級和

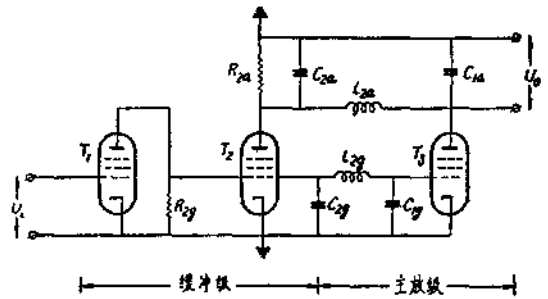


圖 6 Pettit 和 Pederson 雙管分布單元

綜合級

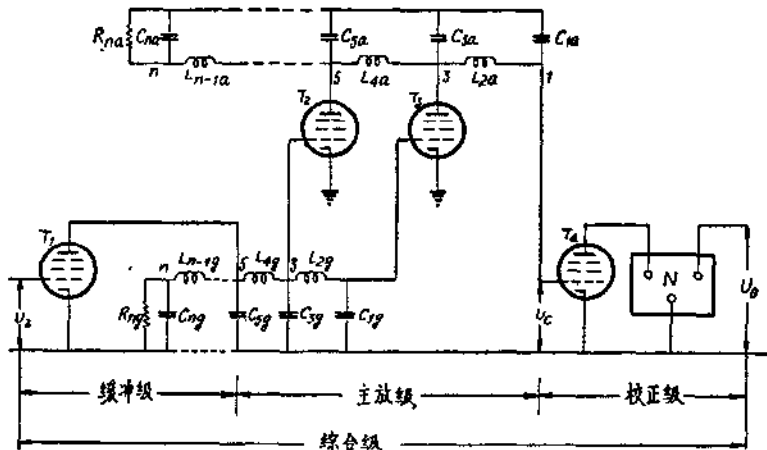


圖 7 採用零極校正級的分佈放大單元

校正級的網絡可以分別設計和實現而不必反復倒算。作者利用 6J1 管，按照他自己的方法設計的綜合級在約 70 兆赫時可得最佳增益 7.4。如果與三個管的 m -導出式分布放大級 ($m = 1.27$ ，不外加柵綫電容) 來進行比較，則在同樣的截止頻率下，李路得法所得出的低頻增益約為 m -導出式的 1.4 倍。作者對他的方法進行了實驗驗證，在通帶內幅-頻特性曲綫的起伏在 0.5 分貝以內。由此可見，利用作者的方法來設計通頻帶不很寬的分布放大器是比較有利的。在同一篇文章內，作者還討論了暫態情況下的分布放大器綜合法，但所得到的增益要低得多。

較寬頻帶和較高增益的分布放大器的研究仍然是一個十分重要的課題。看來應首先利用現有器件研制出能穩定工作於 200 到 400 兆赫通頻帶的高增益分布放大器。同時，希望電子管工作者對一些電子管的結構進行改進，特別是電極的引出綫問題。應該說，即使管的品質因數增加不多，而電子渡越時間仍然保持原狀，也不是沒有希望把分布放大頻帶推進到 500 兆赫以上，如管的特性更好，則可能性更大。事實上已有人報導過利用超高頻四極管製成通頻帶接近於 1000 兆赫的分布放大器^[22]，而且有人利用品質因數較好的放大管(真空管和晶體管)製成了幾種通頻帶超過 500 兆赫的帶通分布放大器^[20]。

可以附帶指出，除了在毫微秒脈沖工作中應用以外，分布放大器還是一種很好的、能放大頻率或相位變化範圍很大的連續波信號的放大器，利用它還可以獲得几乎是任意大的輸出功率。Barge^[27] 所製作的大功率分布放大器是一個例子，它是用來驅動作為 Princeton-Pennsylvania 同步質子加速器無線電能源的更大功率的末級放大管的。加速器要求能源頻率以 3200 兆赫/秒的速度在 2.5 與 30 兆赫內進行掃掠，如用一般的調諧放大器進行放大，無疑困難是很大的，只有分布放大器提供了直接解決這一問題的可能。文中分布放大器的最後推挽級每邊應用 17 個 Eimac 4CX300A 管(板耗 300 瓦)，各得到 8 瓩的輸出功率。整套分布放大器功率增益為 5000 倍。

由於電子器件的改進(器件品質因數的提高和超高頻特性的改進)而利用較簡單的綫路即能達到很寬頻帶，當然是最值得注意的重要發展。(分布放大終久是不很經濟的辦法)已經有一些高頻晶體管的電流增益-頻寬乘積接近 1000 兆赫(例如 2N700, 2N709, 2N976 等)。能放大毫微秒量級脈沖的晶體管放大器已有很多報導^[28-30]，文獻[28]中的前級放大器，利用 2N700 管和簡單補償綫路得到電壓增益 27 分貝，升起時間 4.5 毫微秒；文獻[29]中則報導有人利用兩級 2N700 晶體管即達到 20 分貝的增益和 2.1 毫微秒的升起時間(相當於 200 兆赫的頻寬)；文獻[30]則利用雙管反饋放大單元製作了放大倍數達 1580 倍，總升起時間約 3 毫微秒的整個晶體管放大器。也有人利用晶體管製作分布放大器^[31,32]，但在頻帶寬度上卻沒有較突出的優點。晶體管放大器體積小，耗電省，較之電子管分布放大器有相當優點，但是輸出功率較小，適於做前級或小功率放大器。

對於一般難於得到優質器件的實驗室來說，令人感興趣的一項工作是利用脈沖電源提高某些類型電子管的瞬時跨導值並借以增加放大器頻寬及其輸出功率。這一方法是在 1959 年首先由 Whitway^[33] 提出而應用於二次發射管的。他們利用兩級 EFP60 管，加上 1500 伏、持續期 50 微秒的脈沖高壓，將管的跨導自 23 毫安/伏，提高到 136 毫安/伏，製成放大器得到 12 倍的增益和 220 兆赫的通頻帶。Веретеника 等^[34] 則對二次發射管的板極經常加 1000 伏高壓，柵極加 -75 伏電壓使管截止，而在帘柵極和二次發射極上各加 300 伏的脈沖高壓使管子工作，在工作時間內可得 100 毫安/伏的高跨導(為正常工

作时的4倍)。他們用一个管即制出增益12—16倍而頻寬約200兆赫的放大器。Колотов等^[35]将同样方法推广应用到較一般的高跨导管,例如6Π15Π, 6Π14Π和6Ж5Π等。板压和帘栅压提高到600至1000伏,而由加于栅极或帘栅极的脉冲电压来使管工作(帘栅极平时不加高压),可以把跨导提高3—4倍。他們用6Π15Π管制成了增益30倍,升起時間2~3毫微秒的放大器。脉冲供电的放大器的缺点是重复频率較低(最高为数千赫),而且供电脉冲須与信号同步。其突出的优点是輸出功率大,可在較小的阻抗上得到很大的电压,显然,这是由于电源电压提高后板流大大增加之故。例如6Π15Π輸出可达90伏,而二次发射管輸出則甚至可达数百伏!这是很可贵的特点,我們认为,在短脉冲的产生中,这一特点也可以被利用。

人們也試驗了用其他方法提高放大器的通頻带来放大超短脉冲。由Percival^[36]与分布放大的概念一起提出的傳輸綫管在五十年代初期即已有人进一步研究^[37,38],但迄今尙未見付諸生产,估計是由于管内各个部件所要求的精确度过高而难于制作之故。将直流信号脉冲調制微波,得到微波脉冲后利用已有的微波寬带带通器件,特别是已經普遍使用的行波管,来进行放大,然后經過检波以得到輸出脉冲的放大方法是另一个值得注意的嘗試。Strezer^[39]于1958年試驗了这个方法,他所用的微波频率是3750兆赫,得到20分貝增益和0.7毫微秒的升起時間,輸出2.1伏。这虽不是一种經濟的方法,但在毫微秒脉冲技术中引用已有的微波器件和元件这一想法在实验室工作中仍然有进一步研究的价值。

綜上所述,我們可以得出这样的結論。实际有用的寬带脉冲放大器在目前的水平还只能达到放大升起時間不短于1毫微秒的脉冲。下面我們將看到,这一水平較超短脉冲其他方面的发展水平为低。进一步突进到次毫微秒量級的根本要求是研究新的电子器件和新的放大方法。对于較近期的任务來說,則一方面是改进分布放大的設計方法和充分发挥器件脉冲特性的潛力,借以在数百兆赫的通頻带范围内得到較好的結果。另一方面是利用現有的高频晶体管,研制出尽量寬的通頻带的放大器。

三、超短脉冲的产生

在快速反应的物理实验、高速运算设备、高鉴别率设备以及超高频电子器件和电子綫路的試驗中,超短脉冲产生器都是必不可少的部件。可以說,某一类有效的新型超短脉冲产生方法的出現也即是进入另一更高速度領域的标志。許多新的物理方法和新型器件的研究常常首先以信号的产生为目的。近年来由于固体电子学的发展,超短脉冲产生的进展是比較快的。但从产生器的綫路原理來說,則基本上和較寬脉冲的产生相同。超短脉冲产生綫路的特点是綫路必須能充分发挥器件的脉冲性能,在綫路中充分利用了高频傳輸綫和电纜,以及杂散参量在綫路中起了不可忽視的作用等。从使用要求的角度来看,我們可以按所能达到的最高重复频率的极限来分成低重复频率、中重复频率和高重复频率几类。数百赫以下者为低重复频率,数百赫至兆赫者为中重复频率,兆赫以上者为高重复频率。这一分法当然不是絕对的,下面大致按这样的分类来进行評述。

低重复频率超短脉冲产生器中应用最广的是利用特殊的机械开关开启或关闭一直流电源,借以得到一上升或下降非常迅速的阶跃式电压或电流变化,并使它进入特定长度的傳輸綫或其組合,以形成所需要的脉冲(图8)。这项工作中的主要困难是工艺問題,而其

中以接触良好，接触时无跳跃现象和火花放电开关的制作为主要难点。根据许多人的经验，这类开关中以装置于高压氩中的水银开关为最佳。应用同轴水银开关装置，一般可以得到升起时间 0.1 毫微秒量级的窄脉冲。最近 McQuillan^[40] 利用微带线代替同轴线作为充放电电路，获得升起时间为 0.5 毫微秒的脉冲，速度虽较慢，但却比较简单而易于装配。这类产生器的缺点之一是重复频率低，最高也不过数百赫 (Brown 和 Pollard^[41])。它的另一缺点是重复周期不十分稳定。Garwin^[42] 于 1950 年所发表的是这类产生器中的典型例子。迄今为止，它仍然是实验室中作为接近理想的阶跃电压源来测试线路过渡过程的常用设备。

低重复频率的高压脉冲可以采用火花隙击穿而使传输线放电的办法来得到。Gunn^[43] 曾用此法得到升起时间小于 0.5 毫微秒，输出达 8 千伏的脉冲。Воробьев 等^[44] 和 Ерозолимовский 等^[45] 分别制出了输出电压高至 16 千伏和 100 千伏的火花隙放电毫微秒脉冲产生器，脉冲升起时间约为 1 毫微秒。后一个产生器所达到的电压升起速度是 10^{14} 伏/秒，估计这是目前做到的最高速度。

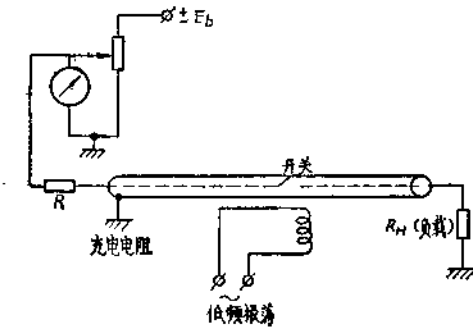


图8 传输线放电形成脉冲

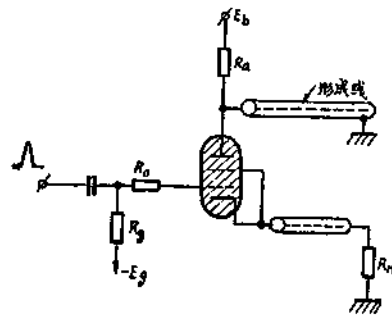


图9 简单闸流管放电脉冲产生器

应用同样的传输线放电原理，但将开关元件换成充气闸流管，可以将重复频率提高到数千至一万赫的范围。图9为其典型电路。为了得到短的升起时间，必须使用电离速度较快的充气闸流管，如 3C45, 5C22, ПИ1-35/3, ПИ1-50/5 等。文献[46]报导利用 5C22 管，在 50 欧上得到 25 千伏，升起时间 1.75 毫微秒的脉冲。应该指出，使用闸流管时，如栅极触发脉冲前沿较陡，幅度较大，则可加速它的电离而得到较快升起的输出脉冲。例如文献[47]中所用的触发脉冲上升时间为 5 毫微秒、幅度为 200~500 伏。另一方面，由于管内气体电离过程不会每次都完全一致，故闸流管产生器的触发抖动可大至数个毫微秒。如触发脉冲上升快、幅度大，则触发延迟和抖动也可以相应减小。

关于高压毫微秒脉冲的产生，包括利用火花隙和闸流管放电的在内，Воробьев 和 Месяц^[48] 在他们对这一问题的专著中有详细的总结。

如需要的脉冲幅度不大，升起速度较低，则可利用其他较小的闸流管，如 2D21, 2050, ПГ3-0.1/1.3 等。Wells^[49] 指出，当放电管为 2D21 型时可得输出脉冲升起时间约 10 毫微秒，而当放电管为 2050 型时升起时间约为 5 毫微秒。为了提高重复频率，在闸流管板极回路中接有高阻，使板压于每次脉冲过后保持于很低的数值，管内离子易于复合，消电离时间减短，第二次被触发之前，辅助电路使高压重新加于板极，将电缆充足电。利用这样的线路，虽然所用的闸流管不是充氩气的，但也能达到 10 千赫的重复频率。最近廖

孟揚等^[50]利用后加正脉冲于閘流管柵极以驅散正离子壳层的方法减小消电离时间,提高重复频率,作者以实验証明 2D21 管的消电离时间可自 130 微秒減低至 10~16 微秒,而产生器的脉冲重复频率可增至 50 千赫。

阻塞振蕩器可产生較高重复频率、較大輸出幅度的脉冲,应用較大跨导的电子管和高頻高导磁率鉄心可以制作出毫微秒数量級的脉冲产生器^[51,52]。正如緒論中已經指出的,在甚短脉冲情况下,綫路的杂散参量对于工作有很大影响,而对于阻塞振蕩器來說,由于鉄芯綫圈引入很多的分布参数,使計算更为复杂,1960 年 Мельников 和 Шац^[53,54]对于毫微秒阻塞振蕩器进行了較詳細的計算。他們分析了大工作电容下(这时磁化电感对脉冲波形参数起决定性影响)及小工作电容下(这时磁化电感和工作电容同时影响脉冲参数)的工作过程,画出等效綫路,将电子管特性折綫化后解出脉冲过程各阶段的电路方程,作出了設計用的一些图表,据称設計和实验結果間的誤差不超过 20%。应该指出,該文中計算鉄芯脉冲导磁率的方法是不够准确的,他們的設計方法則仅适用于数十毫微秒量級,如脉冲宽度再次減短(利用阻塞振蕩器可产生短至 10 毫微秒以下的脉冲)則因鉄芯有效导磁率急驟下降,設計精确度已有問題。同时,由于耦合系数降低,变压器的漏感問題将变得較为严重,在計算上还須进一步修正才能适用。阻塞振蕩器振蕩的重复频率可以达到几兆赫,較高重复频率的产生器可以利用它来作为主振級。

由于触发脉冲的加速作用,利用多級触发式阻塞振蕩器可以获得更短的脉冲。Глебович 和 Моругин^[52]曾用三級 6H15П 管获得 6 毫微秒宽度的脉冲,我們用此綫路与高跨导管削波微分电路连接,得到 2 毫微秒以下的脉冲。

在快速上升或毫微秒宽度的脉冲产生器中二次发射电子管的利用一直受到人們的注意,应用二次发射管于一般触发器和多諧振蕩器中可以增加輸出脉冲的升起速度,利用单个二次发射管可以制成快速触发器和多諧振蕩器^[52,4]。

由于二次发射管可以有二次发射极和板极两个极性相反的輸出,故利用单个管便可以制成触发器或多諧振蕩器,制作时可利用两种反饋形式,一为自二次发射极到柵极的反饋,另一为自板极到阴极的反饋(分別見图 10(a) 和 (b)),单級产生器可获得升起速度大于 10^9 伏/秒量級,宽度达数个毫微秒的脉冲。

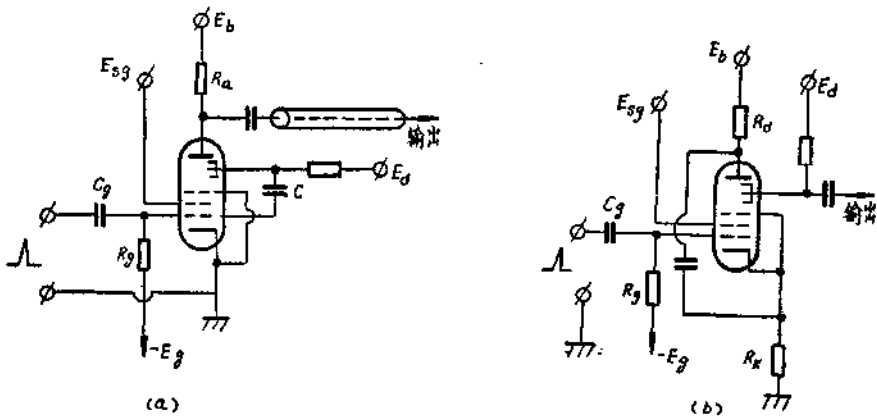


图 10 两种二次发射管触发器

二次发射管产生器虽然已被用得很多，但它們的设计方法研究得还不够彻底，实验验证也不够详尽。文献上已做过的工作大多是针对第一种反馈形式——即从二次发射极到栅极的反馈——的产生器。这类产生器的简单设计方法见于 Ицхоки^[55] 的著作。1960年 Narud^[56] 对这一类产生器进行了比较详细的分析。他假定二次发射极电流在一定的正栅压下达到一饱和值，而在该值之前可以用两个二次多项式的比来代表它随栅压变化的关系，然后以解析方程算出跃变点和脉冲宽度等。对于升起时间，则假定一标准的触发波形输入到带有杂散参量的高频等效电路求出过渡过程来进行计算。作者所得到的结果可以解析脉冲波形和所选择的电路参数的关系；所得到的一些结论也较有普遍意义。例如作者指出：要得到顶部较平的脉冲必须选择较小的 γ ($\gamma = 1 + R_d/R_g$ ，式中 R_d 为二次发射极负载电阻， R_g 为栅漏电阻)，即使 R_d 较小；要得到较窄的脉冲必须选择准稳态点接近于二次发射电流之饱和点；以及所能得到的最窄脉冲宽度系反比于

$$\eta = \frac{I_{ds}}{(E_{cs} - E_{co})C} = \frac{\text{二次发射极饱和电流}}{(\text{饱和点和截止点栅压之差}) \times (\text{二次发射极、栅极及接线电容之和})}$$

等。Narud 文中的缺点是沒有考虑栅极电流的影响，而事实上在栅极校正时这一影响是很大的（参考图 11 二次发射管的正栅特性曲线）。文中也沒有考虑二次发射极电压变化的反作用，这在 R_d 较大时是不可忽视的。

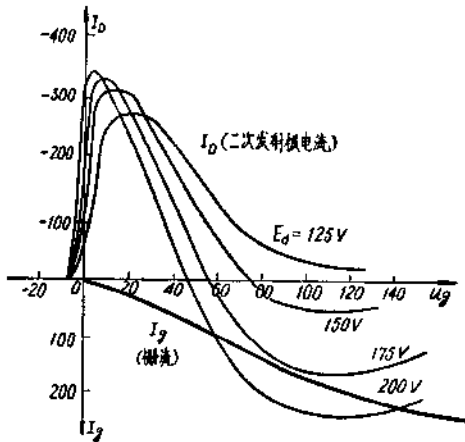


图 11 二次发射管正栅特性曲线

国内的脉冲线路工作者对于二次发射管产生器也进行了一些实验和理论计算工作，曹揆申等^[57]列出了考虑栅流和寄生电容影响在内的电路方程后，根据实测的正栅特性和所得出的二次发射极和栅极的差电流特性，画出了振荡过程的相图，从相图曲线方程求出跃变点的坐标，再以逐段逼近法对振荡方程求解，得出脉冲前沿升起时间，脉宽和恢复时间等。作者认为计算结果和实验相当符合，误差约在 10% 左右。由于计算较为复杂，作者仅对一种宽度进行了计算和实验，数据显然还是很不够的。潘华江^[58]对于第二种反馈形式——即自板极到阴极反馈——的产生器进行了较详细的分析计算。由于作者的目的是将产生器应用于较高的重复频率（兆赫），而板-阴间反馈电容必须用得较小，故他在计算脉冲前沿和宽度时还考虑了这个电容中电压变化的影响。计算时利用栅压-板流和栅压-阴极电流等特性，假定板流和阴极电流有饱和点，在二次发射极电压变化不大时，这一假定是合理的。这一计算的实验验证尚待补充。应该指出，除了简单的计算以外，所有二次发射管的有关计算都是相当复杂的，因此，合乎工程设计的便利原则而又较为准确的设计方法还有进一步研究的必要。

二次发射管的最可贵的特点是能给出高速大幅度的脉冲。在放大器一节中已经提到，在较短时间的脉冲供电情况下，二次发射管能给出很大的二次发射电流，即以

EFP60 或 6B1П 來說，电流可大至 1 安以上。据报导，还有能給出更大电流的二次发射管^[35,59]。我們應該密切注意这一可能的发展，并望能充分得到电子管和阴极工作者的帮助。

雪崩式晶体三极管是产生快速升起脉冲的另一种重要器件。这种产生器的重复频率可以从重复频率延伸到几个兆赫^[60]，所能达到的升起速度和二次发射管同一数量级，但输出幅度较小。在晶体管线路中，它所起的作用也和二次发射管在电子管线路中所起的作用相类似。利用雪崩三极管可以简单的线路产生前沿很陡而以电容放电形式下降的脉冲，可用短路微分而得矩形脉冲，和其他类型的晶体三极管组合则可加速它们的升起速度^[60-62]。李錦林等^[62]还提出以雪崩管和高跨导电子管配合运用的中重复频率的具有较高输出幅度的脉冲产生器。取样式毫微秒脉冲示波器采用雪崩管产生取样脉冲，线路简单，触发时延小，十分有利。自 Chaplin^[63] 首先提出后，采用的人很多。应用于中重复频率的另一种雪崩器件——Shockley 四层雪崩二极管^[64]——也是引人注意的。这种器件从“开路”到“闭路”的开关时间可达毫微秒量级^[64]，开关电压可大至 100—200 伏，闭路的脉冲电流可大至数安。它在电路中可以起和气体二极管相类似的作用，但速度要快得多。

近年来，由于高速电子计算机和多路编码通信技术的发展，要求制作更高重复频率的脉冲产生器。重复频率高达 10 兆赫以上的毫微秒脉冲产生器在实验室中已有较普遍的需要，文献^[65]中所提出的产生器是值得推荐的。如果重复频率不需要有太大变化，利用正弦波高频振荡削波是较为简便易行的办法。削波得出的脉冲一般是余弦形的。为了得到较窄的脉冲，可在基波上迭加三次或更高次的奇次谐波再行削波。我們^[66]曾利用此法得到重复频率为数兆赫到十余兆赫而脉冲底宽小于 10 毫微秒的脉冲。更高重复频率的脉冲产生问题也可以用削波方法解决。

另一种常用的，重复频率可达数十兆赫的脉冲产生器是延迟反馈型产生器。这种产生器系由 Cutler^[67] 于 1953 年提出的，他的目的主要是为了制作射频脉冲的延迟反馈产生器。Mоругин^[68] 则对于视频脉冲的延迟反馈线路进行了较全面的研究，包括基本原理、瞬态过程、频谱特性以及各种应用的可能性。作为毫微秒脉冲产生器只是这种线路的应用之一。图 12 是延迟反馈产生器的原理图。

当脉冲输入该系统时，将由延迟线正反馈而不断循环。它虽然由于环路的频带限制而变坏(波形变宽)，但又由扩张器(左边管子)的非线性作用而将其变窄。延迟的损耗则由放大器(右边管子)补偿。自动调节器(左管偏压)的作用则是当每次脉冲过后所产生的附加偏压能在振荡周期的其余部分维持线路的放大倍数小于 1，而不致发生多余的脉冲。此附加偏压在第二个被延迟的脉冲将要来到

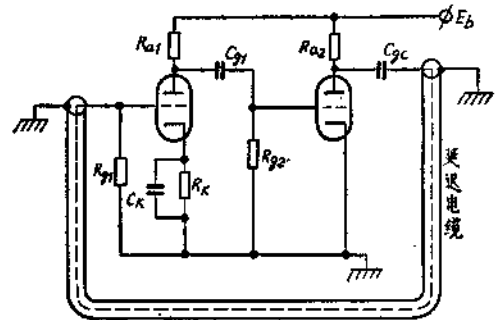


图 12 延迟反馈脉冲产生器

时减小到一定值，而扩张器工作于所规定的状态。产生器的振荡周期决定于线路中的总延迟时间，但主要决定于延迟线的延迟时间。对这类产生器的分析，到现在为止，都是根据环路的频率特性是高斯形来分析的，与实际情况有一定的偏差。已经证明，产生器所能给出的脉冲宽度 τ 可由下式算出：

$$\tau = \frac{4}{\omega_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1}},$$

式中 ω_0 为滤波网络之角频率, γ 为扩张器的非线性系数(如它的输入为 $u_1(t)$, 则输出为 $u_2(t) = Au_1^\gamma(t)$)。由式可见, $\gamma > 2$ 时对于减窄脉宽得益不大, 事实上一般电子器件的 γ 也大概在 1.5 与 2 之间。这类产生器可制成触发式的, 由一输入脉冲启动后即连续振荡下去; 但如降低负偏压, 它也可以成为一个自激脉冲产生器。

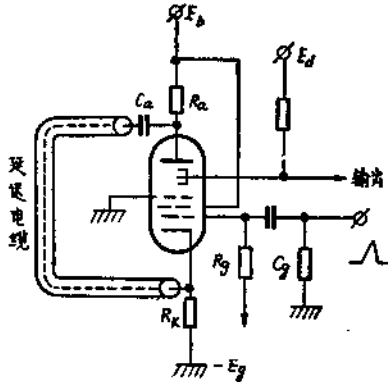


图 13 二次发射管延迟反馈产生器

实际的延迟反馈毫微秒脉冲产生器可以用二次发射管加延迟电缆^[10,69,70](图 13) 或分布放大器加延迟网络^[71] 制成。前者用一个二次发射管起放大, 倒相和扩张等作用, 可以产生数兆赫至数十兆赫, 短至数个毫微秒的脉冲, 文献[70]报导以 EFP60 管板-阴反馈得 50 兆赫、5 毫微秒的脉冲。后者系利用具有非线性电感或电容的延迟网络以得到扩展的效应, 据称可得短至 4 毫微秒的脉冲。

值得指出的是: 触发式延迟反馈脉冲产生器被幅度足够大的触发脉冲触发后所得出的脉冲串的幅度能够很快地达到平稳值。文献[10]还指出, 这类产生器的重复频率稳定度可达 10^{-5} (主要决定于电

缆延迟时间的稳定度), 这在一般非晶体控制的振荡器中已经是很高的。由于这两个特点, 它很适合于在脉冲时间间隔测量中作为时标用, 特别是当测量单次出现的两个脉冲间的间隔时最为合用。我们在一项精密测量时间的工作中应用了这一类产生器, 线路见图 14。图中附加的电子管系作为放大用, 借以保证脉冲经过电缆的衰减后有足够的补偿。当延迟电缆(150 欧) 为 20 米时, 线路工作于 10 兆赫, 输出脉冲底宽约为 8 毫微秒。

在高重复频率脉冲工作中最值得注意是新型半导体器件的发展。它们的目的主要

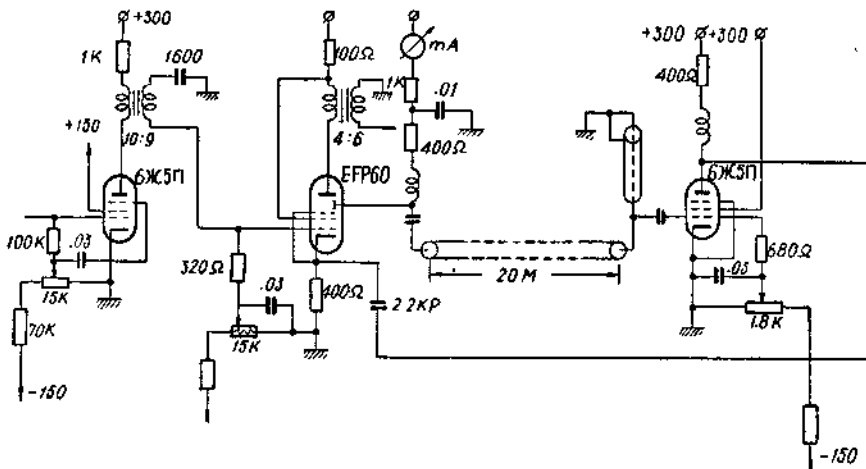


图 14 触发式延迟反馈脉冲产生器

是为了进一步提高数字计算机的运算速度。晶体三极管品质因数和截止频率的提高当然是一个重要的方向,但隧道二极管和新的阶跃恢复二极管在开关速度上已遥遥领先。

目前隧道二极管已经是比较普遍应用的器件,它具有负阻特性,可以制作具有触发特性和振荡特性的线路单元。如果从载流子穿过隧道的速度来估计可能达到的开关时间,则它甚至可以短至微微秒量级,但事实上由于器件的结电容必需有充放电的时间以及线路分布参量的影响,故实际的开关时间可短至0.1毫微微秒量级^[72,73],1962年Bergman等^[74]利用隧道二极管和相应的辅助器件和元件研制出成套的重复频率高达200兆赫的计算机线路单元。吴锡九等^[75]最近对Bergman文中提出的单稳电路进行了更详细的分析,并在实验室内获得升起时间短于1毫微微秒的脉冲。Miller和Powlus^[76]及Sear^[77]还利用隧道二极管制出了工作于上千兆赫的逻辑单元。作为高重复频率的脉冲产生器,文献[78]是一个例子。该文报导利用隧道二极管产生了重复频率达100兆赫的脉冲,输出电压幅度虽不大(210毫伏),但脉冲电流可达数安。

1960年首次提出的阶跃恢复二极管(亦称电荷贮存二极管)^[79]又给超短脉冲的产生带来了许多革新。作为开关应用时,二极管可先加正向偏流,贮存少数载流子,同时在P-N结上形成强烈的减速场。此减速场使非平衡少数子紧靠结界面附近分布,当外加反向电压抽运少子而使贮存期结束时,二极管以阶跃特性恢复至不导通的状态。恢复时间可快至毫微微秒和次毫微微秒量级。这类二极管的特点是它可以比隧道二极管处理更大的脉冲电流而且能在更高的外加电压下工作(可以工作于上百伏的电压)。多种利用阶跃恢复二极管的电路已经得到了发展^[80-82]。我们在这里举出两个应用于脉冲产生的例子。图15是从高频正弦波获得高重复频率毫微微秒脉冲的线路;图16是一加速脉冲前后沿到毫微微秒级的线路,负载电阻上所能得到的脉冲幅度为伏的数量级,重复频率可以很高。1963年Sear^[83]利用阶跃恢复二极管和隧道二极管的组合,克服了隧道管不能得到大的线路增益

(此处的增益系指“逻辑增益”,是能被某一逻辑电路的输出所触发的重复性电路单元数目。因为隧道二极管是双向的,故其逻辑增益包括它所能触发的接于输入和输出两方面的单元的总数。)的缺点,制成了能工作到250兆赫的多种逻辑电路单元。

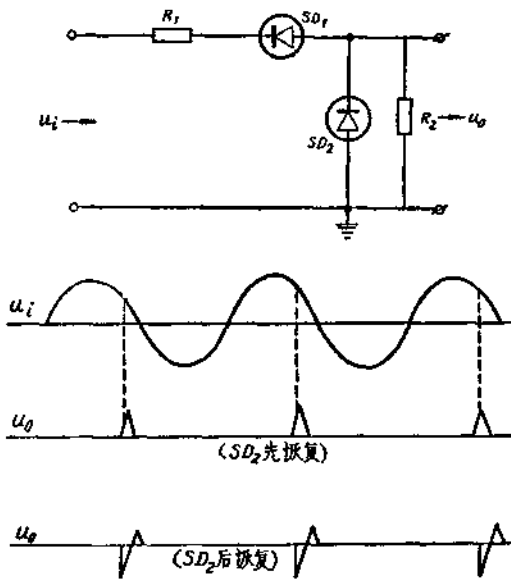


图15 利用阶跃恢复二极管将高频正弦波转换为高频窄脉冲

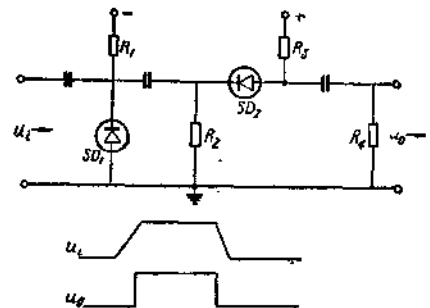


图16 利用阶跃恢复二极管加速脉冲前后沿

有理由相信,阶跃恢复二极管将被推广,十分便利地应用在很多需要加快升起速度,提高重复频率的地方,我们应该充分予以注意。

还有其他一些产生高重复频率毫微秒脉冲的尝试,文献[67]提出利用微波延迟反馈原理,获得重复频率为24兆赫,脉宽为5毫微秒的微波脉冲。文献[84]以特高频振荡控制行波管栅极,使输入微波在极短瞬间通过,在管的输出端得到特高频微波脉冲。如把这些微波脉冲加以检波,可望得到很短的视频脉冲,但这样做显然是很不经济的。文献[85]提出了一种利用速调管聚焦方法获得重复频率为100兆赫,脉宽窄至300微微秒的脉冲。但这些方法看来都不如半导体器件简便、有效和易于组成各种实用的电路。

应该指出,能工作于中、高重复频率的器件(微波器件除外),绝大部分都能工作于更低的重复频率和单次的动作。因此,上面提到的二次发射管、隧道二极管、阶跃恢复二极管等都可以在低重复频率的超短脉冲产生器中运用。

在产生器方面,我们最后还应该总结一下在快速脉冲电路中非常重要的高分辨率二进位触发器问题,在快速计数、检测和运算等工作中,由于脉冲幅度问题并不是主要的,只要前级给出的幅度能可靠地推动下级即已足够,故可以肯定地说晶体管已较电子管占优势;在电子管触发电路方面,虽然有多种增加翻复速度的方法,例如提高电子管的跨导/电容比值,利用动态板阻^[86]等等,但文献中所报导的最高工作频率也只达100兆赫左右^[87]。另一方面,晶体三极管二进位器则已做到能工作于200兆赫以上^[88,89]。图17是文献[89]

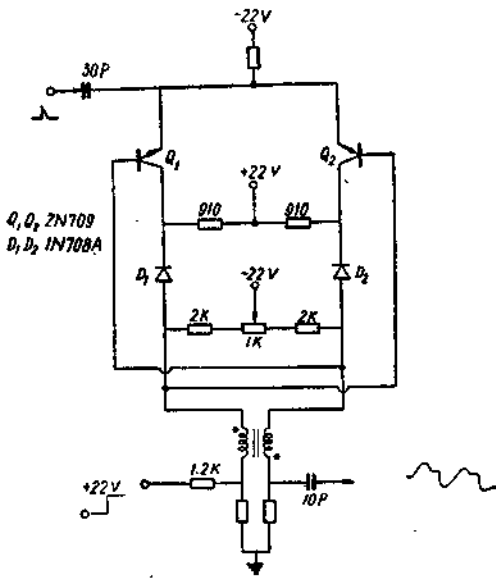


图17 200兆赫晶体管二进位单元

中提出的一个高频晶体管二进位器线路,它能工作到300兆赫。利用隧道二极管还可以制作速度更快的二进位器,已经应用的也已在200兆赫以上^[90]。

总的说来,在超短脉冲的产生方面,半导体化的要求十分突出。如果输出功率和幅度不是重要的话,则我们说,在不久的将来,所有的窄脉冲产生器都将是利用半导体器件的,也不为过分。在半导体器件中,新型隧道二极管和阶跃恢复二极管等是最值得注意的。另一方面,为了获得较大的输出功率和幅度,满足实验室内各方面的需要,充分发挥高跨导管,特别是二次发射管的潜力也是不可忽视的工作。在目前已能较好地掌握了毫微秒级脉冲产生的基础上,进一步的

四、超短脉冲的传输

脉冲技术实验中可靠成果的获得以及脉冲速度的提高和传输线路及有关机构的性能有十分密切的关系。许多经验告诉我们传输线和脉冲设备间阻抗关系的选择,线间的联