

微波與半導體

成 众 志

半导体在微波电子学中占有很重要的地位。早在第二次世界大战中，就曾应用半导体二极管解决了雷达接收机的变频和检波的问题，从而提高了它的灵敏度。二次大战后十余年来，半导体在微波领域中的应用有了迅速的发展。例如，晶体管的有效工作频率，最近已达到厘米波范围；利用半导体二极管的可变电容的性能研制成功了低噪声半导体二极管微波参量放大器，这种放大器已用在远程雷达中；应用变容管的振荡、变频或倍频性能；做成了微波计算机的主要元件。其他，如应用各种新原理制成了一些负阻器件，以及利用霍尔效应制成了微波传输元件及微波测量设备等。

由于半导体材料及器件在微波领域中的应用日益广泛，因而促使人们对半导体的一些基本的微波性能（如半导体的微波趋肤效应、半导体材料在波导中的传输特性、半导体微波共振性能等）进行研究，这项工作虽尚处于初始阶段，但已使微波电子学和半导体电子学互相融合渗透，从而形成了“微波半导体电子学”这门新的学科。

微波半导体电子学的内容很丰富，现仅简单介绍几项比较成熟而且极为重要的工作。

用于变频及检波的半导体微波二极管

变频及检波用的微波二极管主要是使用

它的可变电阻性能，故可称为可变电阻二极管。它的电学性能可以用简单的等效电路（图1）来表示。

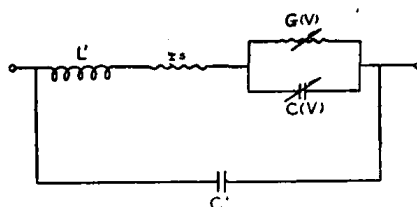


图1 二极管等效电路

r_s 为体积电阻 $C(V)$ 为二极管的可变电容
 $G(V)$ 为二极管的可变电导 [$C(V)$ 及 $G(V)$ 和二极管上的电压相关] L' 为引线电感 C' 为杂散电容

这种二极管的主要关键问题是减小变频损耗，改善噪声性能，增加功率，增高使用温度，提高使用频率，改善均匀性等。

为了提高变频效率，需要减小体积电阻 r_s ，可变电容 $C(V)$ 及引线电感 L' 。近来在研究半导体材料的性质和减小二极管 $r_s C(V)$ 乘积的关系方面，导出了以下的结论：根据变频损耗的大小来比较，用锗制的二极管要比用硅制的小，用N型锗可以得到较好的结果，用其他三、五族材料，例如砷化镓等也可获得良好的结果，而用硅或砷化镓制成的器件在使用温度上可以比锗二极管高。

在微波二极管的结构方面最显著的进展是采用了“台面”式的构造。早期的二极管采

用点接触型构造，将金属丝触在半导体材料上。根据已往的工作证明，减小接触面积（减小金属丝半径）可以减低 $r_s C(V)$ 乘积，但是由于金属丝半径减小后，机械强度也相应变弱，使二极管不够坚固和稳定，因此金属丝半径的减小是有限制的。现在应用了扩散法、微合金法以及喷注法等工艺将半导体制成了薄片的二极管或台面式二极管（图 2，a 及 b）。根据分析，可知减薄半导体层的厚度 W ，可以减低 $r_s C(V)$ 乘积。采用台面式

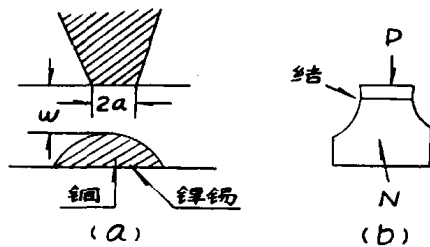


图 2 二极管的构造

的结构是很容易控制半导体层的厚度的，利用减薄厚度的办法，可以提高检波频率至 10^6 兆周（波长为 0.3 毫米），而一般的硅微波二极管，仅能在频率低于 10^5 兆周时（波长长于 3 毫米）进行检波。

微波二极管必需和微波波导等传输元件配合起来使用，根据与波导的配合方式又可将二极管分为可调式及非可调式二种。采用可调式二极管时，传输系统内必需另加可调元件，当换用不同的二极管时，需将传输系统加以调整。非可调二极管就不需要加以调整，使用起来比较方便，但是因此对二极管构造的均一性要求极严。如对杂散电容的均一性，以前管内所采用的圆柱型高频瓷绝缘尚难满足要求，若采用同轴型的构造，用水晶材料制成圆盘形的管壁，则可获得好的结果，这些改进的方法现正在继续研究中。

用于参量放大、振荡、变频及倍频的半导体变容二极管

为了解决雷达远距离接收的问题，需要采用具有低噪声的微波放大器，若用可变电阻型微波二极管，则有较大的变频损耗及较高的噪声水平，因而使接收机的灵敏度及通信距离受到限制。近年来在量子放大、参量放大（包括半导体变容二极管、铁氧体及电子束等种种参量放大）等方面有了极显著的进展。半导体参量放大器已正式应用在射电天文等方面，它和量子放大器已成为目前提高微波放大器灵敏度的二条主要途径。

参量放大是利用某种元件的非线性电抗性能，将在某一频率的微波能量（通称注入频率，用 ω_p 代表注入角频率）转换成放大讯号频率的微波能量（用 ω_s 代表讯号角频率），从而将讯号放大。这和通常所用的放大器不同，如电子管、晶体管等通常将直流功率转换成讯号功率而使讯号放大。

利用半导体二极管的可变电容性能做成的非线性电抗元件的微波放大器称为半导体二极管参量放大器，或称变容二极管参量放大器。

根据相似的原理，参量元件也可作参量振荡、变频、倍频以及分谐波振荡等用。根据所得输出功率的频率的关系及讯号功率的有无而决定属于那种用途。

虽然变容二极管的等效电路与图 1 相同，但主要是利用它的变容性能，即电容与电压间的关系 $C(V)$ ，故等效电路更可简化如图 3，图中忽略了杂散电容 C' 及引线电感 L' 的作用。

为了改善变容管的参量特性，应该减小体积电阻 r_s 、引线电感 L' 、杂散电容 C' 以

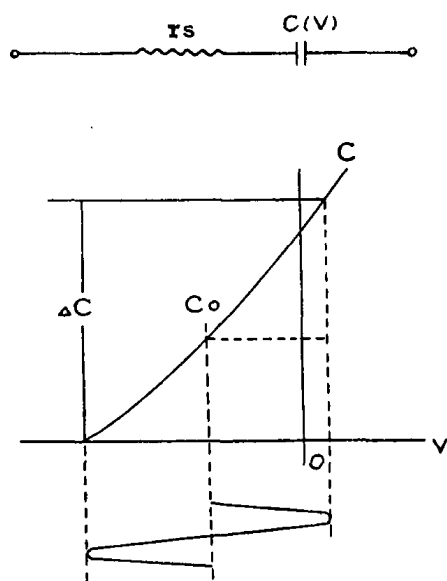


图3 变容二极管的简化等效电路和 $C-V$ 曲线

及可变电容器在某一偏压时的值 C_0 ，增加非线性电容的可改变范围 ΔC （根据二极管在正向使用时所引起的衰减及反向使用时反向电流所引起的散射噪声， ΔC 的值有一定的限制）。

各种参量应用对变容二极管的性能有不同的要求，在获得了合适的变容二极管后，设计和制造参量放大器的方面也还存在着许多问题，需要选择注入频率及二极管的偏置，设计微波传输系统，和如何来获得最佳低噪声、最高增益以及所需要的频宽等。

根据所用注入频率的高低（对讯号频率来说），参量放大可分为高注入频率和低注入频率二种。后者注入频率低于讯号频率，故在较高讯号频率时，可用低频率注入源，这样可以避免前者需用高频率注入源的困难。

为了降低噪声，可以将传输系统和某些特种元件互相配合起来，如和铁氧体迴旋器配合使用。将二极管置于低温中亦可使噪声性能得到改善。

根据对频宽的要求，放大器又可分为空腔式及行波式二种。在空腔式放大器中，变容管和谐振腔耦合，频宽较窄。在行波式放大器中，将多个二极管组成周期性的负载，置于波导传输线中，频宽较宽，但对二极管的均一性要求较严。也可以采用单个二极管和多个互相耦合的谐振腔来获得较宽频宽的放大器。

在获得更大的增益方面，超再生式放大是很有前途的。

各种形式的变容二极管参量放大器已在宽广的微波范围内进行了实验，结果证明噪声温度可以低至十几度绝对温度，可以提高远程雷达接收机的灵敏度。现在这种放大器已经应用在观察金星的射电天文设备中。

近五年来，在微波二极管倍频方面的理论分析及实验工作有了一定的进展。主要的方向是要产生出更短波长的电磁波。现在利用点接触型锗二极管或砷化镓二极管的毫米波倍频，已获得了 6.25 毫米、3 毫米等较短的毫米波，但是它的功率较小。在增加倍频效率、减低倍频损耗、增加功率以及提高频率方面还需要进行大量的研究工作。

也可以采用参量变频的形式来进行讯号放大，如可采用“上变频”的形式，即将讯号进行参量变频，输入讯号频率为 ω_s ，注入频率为 ω_p ，将输出讯号从 $\omega_p + \omega_s$ 的回路中取出。这种参量变频具有低噪声放大的能力，并且非常稳定。它和前述变阻微波二极管变频不同，普通的变频具有衰减而不进行放大。

微波计算机和半导体元件

近年来，在计算机的运算系统中出现了各种新的制度。为了提高运算速度，已将

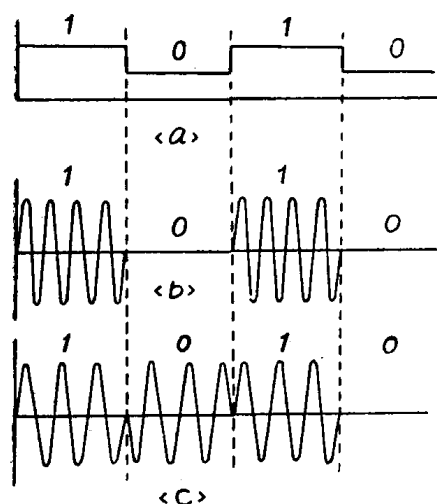


图4 三种表示0,1的方法
a. 电位法; b. 射频脉冲法;
c. 相位法

最初用的电位法(即以高电位及低电位来分别代表0,1两种稳态,见图4a)改为射频脉冲法(用有脉冲状态及无脉冲状态来分别表示0,1两种稳态,见图4b),又采用了相位法(即用某种振盪的两种不同相位来分别代表0,1两种稳态,见图4c)来提高速度。在这二种改进的方法中均可采用半导体二极管来作基本元件。在射频脉冲法中用半导体二极管做微波开关及调制器,使微波讯号通过或不通过,而产生0,1状态。在相位法中是利用变容二极管分谐波振盪的两种不同相位。

以上这些新的制度是微波计算机的基础。现将它所用的主要元件分述如下。

一、变容二极管分谐波振盪

用非线性电抗产生振盪,若振盪频率 ω_0 为注入频率 ω_p 的一半时($\omega_0 = \omega_p/2$),即获得分谐波振盪。这种振盪可能具有两种相位(图5中相位A及相位B),而所振盪的相位可由外加的相同频率的控制讯号所控制。如图6所示,注入讯号由A处耦合输入到振盪迴路B,控制讯号由C处输入,分谐波振盪

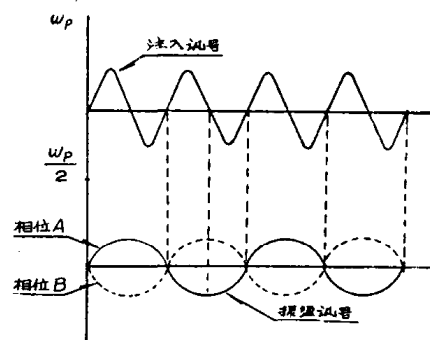


图5 分谐波振盪相位关系

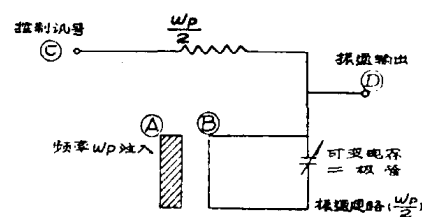


图6 变容二极管分谐波振盪器示意图

讯号由D处输出。

在微波频段内实现分谐波振盪的具体方案与选用的传输、振盪、耦合系统有关。在厘米波段中($f_p = 4$ 千兆周, $f_0 = f_p/2 = 2$ 千兆周)有一种方案是采用带状波导的结构,在振盪性能、相位控制等方面已获得了一定的结果,但是所需滤波器等传输迴路的体积较大,屏蔽隔离较为困难。厘米波段中的另一种方案是采用对称平衡式振盪的办法,取一对相似的二极管作为传输双线的组成部分,构成振盪迴路,然后外加屏蔽。这样获得了注入迴路与振盪迴路之间的良好隔离,减去了滤波器等复杂的迴路,使体积缩小,更合乎微波计算机的要求。

提高分谐波振盪器的频率,是提高微波计算机速度的途径之一。曾在实验室内,对注入频率为6万兆周(在自由空间相当于5毫米),振盪频率为3万兆周(相当于1厘米),传输系统为脊形波导等装置进行了研究。

二、二极管微波开关及调制器

在微波计算机及微波宽频远距离多路通讯系统中可用半导体二极管作为微波开关及微波调制器(特别是脉码调制)。

比较简单的二极管微波开关的原理是这样的,将二极管放置在波导管中(图7),由

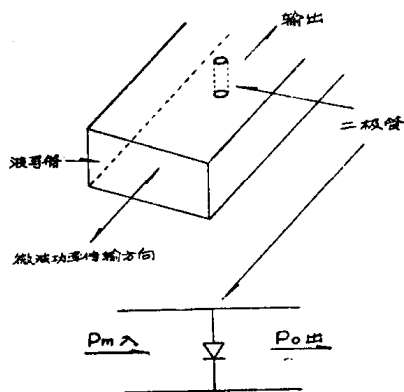


图7 一种微波开关示意图

于二极管在不同电压下的阻抗是不同的,因此对波导中进行的微波功率产生不同程度的吸收和反射,从而使输出功率发生很大的变化。当二极管处在正向时,希望得到较大的输出功率,因此希望由于二极管的存在所引起输出功率降低的程度小;当二极管处于反向时,希望得到较小的输出功率,较大的功率损耗。这就是对微波开关的第一个要求,即要求有较低的正向“嵌入损耗”以及较大的反向“隔离比”。除此以外,对微波开关的使用温度、功率限制以及开关时间等都有一定的要求,希望能够增大功率限制、减小开关时间以及提高使用温度。这种简单的二极管微波开关,在一万兆周附近时,正向嵌入损耗低于1分贝,反向隔离比可达20~30分贝。为了增加反向隔离比,可以同时采用几个二极管,组成串联等不同形式的比较复杂的微波开关。现在二极管微波开关的开关时间已达3毫微秒,在管子管壳、管座等性

能改善后速度还可提高。

利用相同的方法也可制成微波调制器,在实验室中已制成了8毫米波段使用的微波调制器,估计还可以制成6毫米及4毫米波段的。利用本征半导体的吸收性能,采用P-I-N二极管,初步研制成功了毫米波段的调制器。

晶体管在微波领域中的进展

自从1948年发明晶体管以来,提高晶体管的频率一直是研究工作的重要方向之一。1953—1954年提出了漂移管理论后,经过多年的研制,应用了扩散、微合金法等精密工艺,晶体管的频率响应有了显著的提高(通常用截止频率或振荡频率的提高来表示),有些商品晶体管的振荡频率已达几百兆周,然而在厘米波段上应用还存在一定的距离。

在实验室中,采用特殊工艺,减小了P-N结的尺寸,设计出了特种同轴綫型的管壳,已制成锗微合金基层扩散同轴綫型晶体管,使晶体管的振荡频率进入厘米波段,且在分米波段内有了合适的放大性能。有一种晶体管的功率在1000兆周达11分贝,噪声系数为9分贝,而最高振荡频率达3500兆周。

晶体管的频率特性也将会不断得到改善,除了漂移管外,其他特种类型的器件如场效应管、空间电荷管等均在研究之中。可以设想,在取得了一些经验之后,将会提出各种途径来提高晶体管的使用频率,例如采用晶体管的参量性能、变频性能来进行微波放大、变频以及倍频等。

负阻及雪崩性能的应用

在无线电电路中,通称吸收和损耗能量

的元件为正阻元件，而能够产生振荡和给出射频能量的元件(例如振荡器，实际上将直流能量转换为射频能量)则称为负阻元件。近年来应用半导体的“隧道效应”制成了特种二极管—隧道二极管。它具有负阻性能，为一种快速二端负阻元件，这种负阻作用极快，因而能适用在极快速的脉冲线路中，同时在低噪声微波放大、变频及微波产生等方面也很有前途。

隧道二极管的优点为速度高、功率低、抗辐射性强。理论上隧道效应的过程极为快速，而在实际上为负阻的绝对值及电容所构成的时间常数(RC 乘积)所限制，因此各种隧道二极管的速度是不同的，如锗隧道二极管的 RC 常数为 43×10^{-12} 秒，砷化镓隧道二极管为 20×10^{-12} 秒，而铟锑隧道二极管为 5×10^{-12} 秒。在微波领域中应用的器件要求

有小的 RC 常数值，因此可以用三五族化合物材料来制造快速隧道二极管。

现在在低噪声负阻放大器、负阻振荡器、负阻混频器等电路分析及实验方面已进行了大量工作，微波振荡频率已达十万兆周(相当于 3 毫米)，然而振荡功率在毫瓦级及微瓦级，这还有待于提高。

半导体的雪崩现象也极快速，可用来产生快速脉冲，因而它在微波领域中也有发展前途，可能应用雪崩来产生毫米波及亚毫米波。这些工作仅在研究初期。

半导体的一些其他的基本性能也已日益和微波发生关系，例如共振现象和负质量性能等，深入地研究这些新现象，将使微波半导体电子学进一步发展，在国防及国民经济中发挥更大的作用。

蛋白質的半導體性質與生物催化作用

任新民

一 引言

催化作用，一方面和现代化学工业有着密切的联系，绝大部分的有机和无机化学工业过程都是借助于催化剂来实现的；另一方面，它又和生命现象有着密切的关系，在生物体中进行的化学过程，如呼吸、消化、蛋白质合成、光合作用，绝大部分都是借助于生物催化剂——酶来实现的。把生物催化剂和现有的工业催化剂作一番比较，我们就可以

以显明地看出生物催化剂所独有的特点。在一般催化过程中，催化剂绝大部分是简单的无机物质，反应的活化能比较高(大约 16—30 千卡/克分子)，因此一般需要在比较高的温度和压力下进行，而且过程的选择性不高，副反应的发生几乎是不可避免的。在生物催化过程中，催化剂都是具有复杂结构的有机物质——酶，反应的活化能较低(8—12 千卡/克分子)，因而可以在很温和的条件下进行，而且过程的选择性很高，能够进行定