

$n^+ - p$ 型(Hg, Cd)Te 光电二极管的频率响应

胡 德 明

(华北光电所)

摘要——本文对 $n^+ - p$ 型(Hg, Cd)Te 光电二极管的频率响应提出详细的理论分析,描述用行波调制器测试红外探测器频率响应的方法及其测试系统,给出不同工作状态下和不同杜瓦瓶结构的碲镉汞探测器的高频特性。最后提出高频探测器的设计考虑。

一、引 言

众所周知,在红外波段,外差探测比直接探测能够获得更高的探测灵敏度。比如对于 $10.6 \mu\text{m}$ 的光外差探测,其探测灵敏度比直接探测高 7~8 个数量级。所以,在遥感、通讯、光雷达、大气湍流测量、污染检测、红外天文学和红外光谱学等重要领域中都广泛采用外差探测。在上述应用中,由于碰到了大的多普勒频移,所以要求光混频器具有非常大的工作带宽。比如 $10.6 \mu\text{m}$ 的光外差探测,其多普勒频率可达千兆赫量级。因此,采用什么途径来获得宽带的光混频器,便成为器件制造者和使用者十分关心和迫切需要解决的一个实际问题。

在 $10.6 \mu\text{m}$ 的光外差接收机中,有许多探测器可用作光混频器,比如锗掺铜、碲镉汞、碲锡铅、硒锡铅等。由于碲镉汞器件易于获得较大的电学带宽并且具有较高的工作温度,所以被优选用作 $10.6 \mu\text{m}$ 外差系统的光混频器。为此,我们首先从理论上分析光伏碲镉汞器件的截止频率,同时提出红外探测器高频响应的测试方法及其相应的测试系统,然后给出光伏碲镉汞器件的高频性能,并在对测试结果讨论的基础上提出高频器件的几点设计考虑。

二、 $n^+ - p$ 型碲镉汞探测器的截止频率的理论分析

根据参考文献[1]、[2],影响 $n^+ - p$ 型碲镉汞探测器截止频率的主要因素是:

1. 扩散效应

由于扩散效应的影响,探测器响应频率的上限为

$$f_c = \frac{2.4D\alpha^2}{2\pi},$$

式中 D 是少数载流子的扩散系数, α 是光子吸收系数。若 $\alpha = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $D \approx 1$, 器件的截止频率约为 10 MHz。

2. 耗尽区的渡越时间

在耗尽区产生的光生载流子, 由于自建场的作用而被加速, 相应的截止频率为

$$f_c = \frac{2.4V_s}{2\pi W},$$

式中 W 是耗尽区的宽度, V_s 是载流子速度。若载流子速度接近其极限值 $\sim 10^7 \text{ cm/s}$, $W = 3 \mu\text{m}$, 则截止频率超过 10 GHz。

3. 结电容

所有的光伏碲镉汞探测器均存在大小不同的结电容。为了输出电信号, 碲镉汞探测器总是同一定负载电阻相连接。这样, 探测器本身就存在所谓 RC 时间常数。由于 RC 时间常数的存在, 器件的截止频率的上限为

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}。$$

若探测器的负载电阻 R 为 50Ω , 结电容为 1 pF , 探测器的截止频率为 3.18 GHz 。

三、测试方法及系统

利用 GaAs 晶体的一次电光效应做成行波调制器, 以实现 CO_2 激光束的高频调制。

可以证明, 在 GaAs 晶体的 $[\bar{1}10]$ 方向加电场, 当激光束通过长度为 l 的调制晶体后, O 光和 e 光之间的相位差为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} V \frac{l}{d}。$$

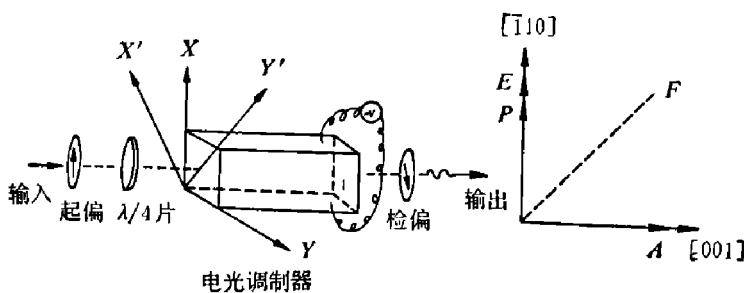


图 1 电光强度调制原理图

式中: l 为通光方向上的晶体长度, d 为调制晶体在电场方向上的厚度, n_0 为晶体材料的折射率, V 为外加电场, λ 为 CO_2 激光的波长, r_{41} 为 GaAs 晶体的电光系数。

激光束通过调制晶体后的透过率为 $\sin^2 \frac{\phi}{2}$ 。这就是说, 由于电场

的作用, 把一束直流光变成了交变光, 从而实现了外电场对激光束的强度调制。电光强度调制原理示于图 1。右边的曲线图示出了 GaAs 晶体取向与外加电场 E 、起偏器方向 P 、检偏器方向 A 及四分之一波片的光轴方向 F 之间的关系。

改变加在电光调制器上的调制频率, 就可以得到探测器的响应随调制频率变化的曲线, 利用这种曲线, 便可判断探测器的工作带宽。

碲镉汞探测器的频响特性测试系统如图 2 所示。该系统由电光调制器、高频发生器、前置放大器, 频谱仪、 CO_2 激光器和被测探测器等部件组成。

电光调制器的结构因工作带宽不同而分为集中参数、谐振腔和行波等几种结构形式。为了获得宽的工作带宽, 选用行波型电光调制器。调制晶体选用高阻 ($\rho > 10^8 \Omega\text{-cm}$) GaAs 单

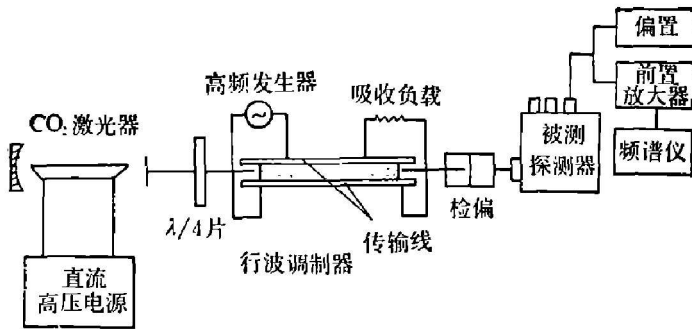


图2 8~14 μm 红外探测器频响特性测试系统

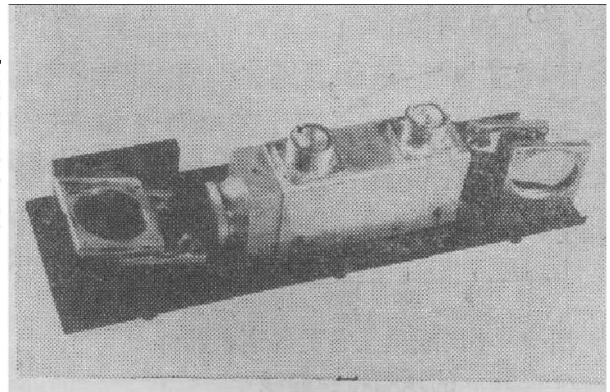


图3 GaAs 行波调制器

晶, 为了保证调制器与高频发生器的阻抗匹配, 选用 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 见方的小截面。为了降低调制电压, 选用 78 mm 长的晶体。为了获得高的调制度, 电场方向加在 $[110]$ 。用钢热合工艺保证了调制晶体与电极间的欧姆接触, 同时减小了不必要的杂散电容。按照上述要求所研制的调制器, 响应频率达 700 MHz, 光学插入损耗小于 4%。行波调制器的外形图示于图 3。

高频发生器分为四个波段: 5~31 MHz, 30~109 MHz, 100~214 MHz 和 200~400 MHz。第一、二波段由于频率较低, 采用共栅接地、电容三点式振荡电路。通过调节电感达到调谐振荡频率的目的。后两个波段由于频率较高, 采用方腔起振, 双线放大工作方式。方腔振荡器产生约 10 W 功率, 再经双线放大器将其放大至 250 W 以上。通过波段开关, 可以很方便地转换到所需波段。高频发生器工作时, 用响应频率大于 400 MHz 的功率计作振荡器的吸收负载。

前置放大器采用直接耦合和电容耦合相接合的 RC 反馈式放大电路, 选用截止频率较高的晶体管, 第一级晶体管的噪声系数应小于 1 dB。经仔细装调, 可以得到带宽达 430 MHz 的宽带前置放大器。该放大器的噪声系数小于 2.5 dB, 增益大于 30 dB, 最小不失真输入信号大于 2 mV。

频谱仪的工作带宽大于 1000 MHz, 整机灵敏度为 -100 dBm 。

采用连续波运转的单模、偏振的 CO_2 激光器作为测试系统的光源。该激光器用一台直流高压电源激励。

四、实验结果

1. 不同结深的探测器的截止频率

用热扩散和离子注入方法都可以获得浅结。然而, 用离子注入更容易获得浅结。我所用热扩散方法成结的器件, 其结深约为 $10 \mu\text{m}$, 而用离子注入方法则可浅至 $0.3 \mu\text{m}$ 。为了比较不同结深的器件的频率响应, 将上述两种工艺成结的碲镉汞器件装入相同结构的高频金属杜瓦瓶内, 然后, 利用图 2 所示的测试系统测试器件的频响特性, 得出如图 4 所示的频响特性曲线。从图中看出, 离子注入工艺成结的器件的截止频率为 150 MHz, 而热扩散工艺成结的器件的截止频率只有 60 MHz。

2. 不同杜瓦瓶结构的器件的截止频率

将成结工艺相同(均为离子注入工艺成结)的器件装入不同结构的杜瓦瓶中。一种是一

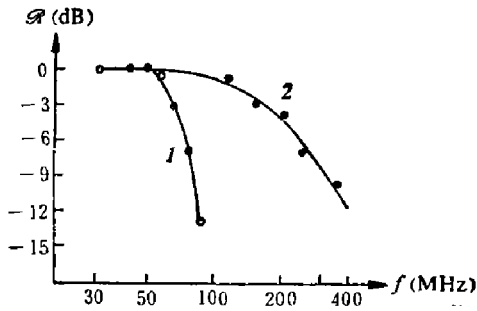
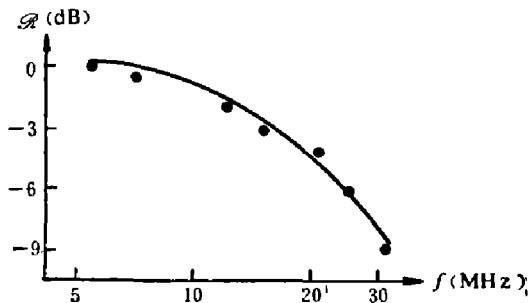


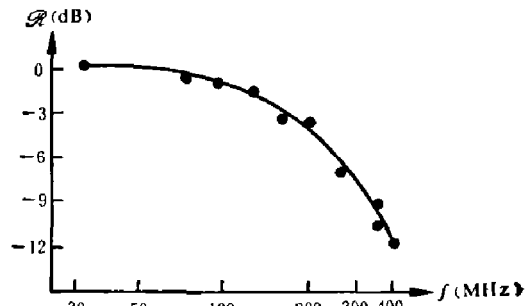
图4 不同成结工艺的碲镉汞器件的频响特性曲线

1—热扩散工艺成结的器件;
2—离子注入工艺成结的器件

的频率响应曲线。从图中看出,未加偏压时,器件的截止频率为120 MHz,加-0.4 V偏压后,器件的截止频率达400 MHz。



(a)



(b)

图5 不同杜瓦瓶结构的器件的频响特性曲线

(a) 玻璃杜瓦瓶结构的器件 (b) 金属杜瓦瓶结构的器件

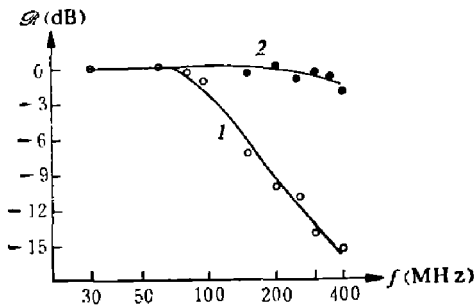


图6 负偏压条件下器件的频响特性曲线

1—未加偏压的器件; 2—加-0.4 V偏压的器件

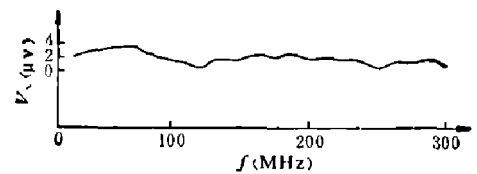


图7 碲镉汞器件的噪声谱

4. 碲镉汞器件的噪声谱

器件噪声谱的测试结果示于图7。从图中看出,噪声曲线除在60~80 MHz处有一小的起伏外,整个噪声曲线直至300 MHz,其变化都比较平坦。

五、讨论和结论

从图4中的曲线1和2看出,由于成结工艺不同,导致器件结深不一样,结果得出显然不同的截止频率。热扩散工艺成结的器件结较深,这样,在距离耗尽区一个扩散长度以外的

那些地方所产生的光生载流子不能立即到达结区,这些光生载流子只有通过缓慢的扩散,才有可能到达结区,对光电流作出贡献;加之在 n^+ 层中所产生的光生载流子是空穴,它的有效质量比较大,从而空穴的扩散就较慢,所以限制了器件截止频率的上限。然而,离子注入成结的器件,由于结较浅,光生载流子产生于一个扩散长度以内的那些地方,这样,光生载流子一旦产生,便可迅速到达结区,消除了缓慢的扩散效应。所以,这种成结工艺易于得到高的截止频率。

加负偏压能提高器件的截止频率。从图6看出,对同一只器件,未加负偏压时,截止频率为120 MHz,加 -0.4 V 偏压后,截止频率提高到400 MHz。这是因为负偏压的设置实际上扩展了耗尽区宽度,这样,就有可能使光生载流子产生在耗尽区,光生载流子在自建场的作用下,以极快的速度运动,其极限值可以达到 10^5 m/s ,所以,可以大大提高器件的截止频率。但每一只器件承受负偏压的大小是受到器件反向击穿电压的限制的,当反向偏压接近反向击穿电压时,器件的漏电流将迅速增大,从而使器件的噪声迅速增大,结果降低了器件的信噪比,显然器件的截止频率就要显著下降。所以,尽管反向偏压的设置可以提高器件的截止频率,但须将反向偏压限制在器件伏安特性的线性区。正因为反向偏压的设置受到器件击穿电压的限制,所以每一只器件都有自己特定的最佳偏压值,只有在最佳偏置条件下,才能获得较高的截止频率。

从图5看出,金属杜瓦瓶结构的器件的截止频率比玻璃杜瓦瓶结构的高得多。这是因为金属杜瓦瓶采用了高频结构的传输线,用同轴电缆把器件引线和杜瓦瓶的输出插头连接起来,保证了器件输出信号的高频传输,从而提高了器件的截止频率。

由于离子注入工艺是将高能离子直接注入到半导体材料中,所以极易获得突变结,大大减小了热扩散工艺所引起的杂散电容,从而显著改善了器件的高频性能。

从器件的噪声谱测试结果看出,在300 MHz范围内,器件噪声随频率的变化是比较平坦的。因受测试仪器带宽所限,未能将噪声谱测至更高频段。

根据上面的测试结果及对结果的分析讨论,我们可以得出下面的结论:离子注入工艺成结的器件,易于获得浅结和突变结,截止频率一般可以达到100 MHz;加适当负偏压,可使器件截止频率得到不同程度的改善,较好器件的截止频率可达400 MHz。

六、高频器件的设计考虑

1. 作浅结,以尽可能地减小扩散效应对器件截止频率的影响。比较易于实现浅结的方法是离子注入成结法,它可使 n 层薄到 $0.3\sim 0.7\mu\text{m}$ 。通过调整 n 层浓度,可以使该层对所接收的红外辐射完全透明。这样,就有可能使大量的光生载流子产生在结区附近或结区,从而有效地提高器件的截止频率。

2. 作突变结,以尽可能地减小器件的结电容。由于离子注入工艺是一种“冷加工”,可以通过调节高能离子的强度来控制离子注入的深度,对于强度等级相同的离子,注入到半导体材料中的深度大致相等,这就极易获得突变结,大大减小了热扩散工艺所带来的杂散电容,有助于改善器件的截止频率。

3. 选取具有高频结构的金属杜瓦瓶。这种结构一方面保证了器件引线与金属杜瓦瓶上的输出插座之间的同轴连接;另一方面由于整个器件完全置于金属杜瓦瓶内,从而又保证

了高频信号具有良好的电磁屏蔽。

4. 探测器本身应具有高的反向击穿电压。这样,可以加较高的反向偏压,提高器件的截止频率。

5. 探测器的输出与前置放大器之间要有良好的阻抗匹配,一般应在器件与前置放大器之间插入适当的阻抗匹配网络,以保证高频信号的传输。

总之,目前采用离子注入成结工艺,选用高频结构的金属杜瓦瓶,并使探测器在负偏压状态下工作,能有效地提高探测器的截止频率。

参 考 文 献

[1] NASA, N80-29652, 1980.

[2] NASA, N80-29672, 1980.

FREQUENCY RESPONSE OF n^+p (Hg, Cd) Te PHOTODIODE

Hu Deming

(North China Research Institute of Electro-Optics)

ABSTRACT

A detailed theoretical analysis of the frequency response of n^+p (Hg, Cd) Te photodiode is presented. The method and the experimental setup for measuring frequency response of infrared detectors by means of travelling modulator are described. The performances at high frequency of mercury cadmium telluride detectors in different states of working and in Dewars of different structures are given. In the end, the design considerations for high frequency detectors are presented.