

红外 CCD 注入效率的理论分析

陈 东 波

(北京工业学院工程光学系)

摘要——本文从理论上导出直接注入式混合红外 CCD 注入效率公式, 该式比 Steckl 的注入效率公式更完整, 增加了 C_D/C_{gs} 项。用典型参数值分别代入两个注入效率公式进行计算, 发现结果有差别。

一、引 言

直接混合红外电荷耦合器件(IR-CCD)在最近几年有较大的发展, 目前, 国内外都在进行理论和实验方面的研究。在对 IR-CCD 机理的研究中, 如何提高其注入效率是关键问题, 许多学者对注入效率进行了理论探讨^[1], 均引用 Steckl 推导的注入效率公式^[2]。作者从理论上重新推导了注入效率公式, 计算机计算结果表明有必要对 Steckl 公式进行修正。本文旨在介绍作者导出的 IR-CCD 注入效率公式, 并讨论各种因素对注入效率的影响。

二、注入效率公式的推导

直接注入混合 IR-CCD 是由 P-InSb 光伏探测器与 N 沟道 CCD 构成的, 其等效电路如图 1。根据等效电路图可写出下列方程:

$$\dot{i}_D = \dot{i}_1 + \dot{i}_2, \quad (1)$$

$$\dot{i}_1(G_D + j\omega C_D)^{-1} = \dot{i}_2(g_m + j\omega C_{gs}), \quad (2)$$

式中 i_D 为红外探测器总电流(可以看作是频率等于光学调制频率的交流电流), ω 为光学调制频率, i_1 为探测器电流, i_2 为输入 CCD 电流, G_D 和 C_D 分别表示探测器的电导和电容, g_m 和 C_{gs} 分别表示输入 CCD 场效应管的跨导和输入 CCD 的电容。

根据注入效率定义, 可知混合 IR-CCD 的注入效率

$$\eta_{\text{注入}}(\omega) = \frac{|\dot{i}_2|}{|\dot{i}_D|} = \left| \frac{g_m + j\omega C_{gs}}{(g_m + G_D) + j\omega(C_D + C_{gs})} \right|$$

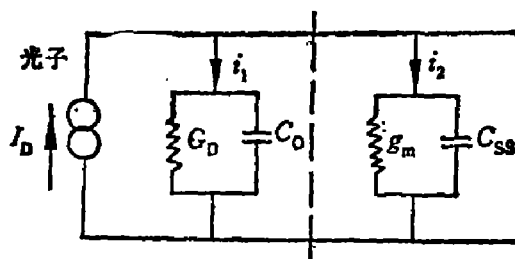


图 1 直接注入混合 IR-CCD 的等效电路
Fig. 1 Equivalent circuit for direct injection hybrid IR-CCD

$$= \frac{g_m}{g_m + G_D} \cdot \frac{P}{1 + \omega^2 [(C_D + C_{gs}) / (g_m + G_D)]^2} \quad (3)$$

式(3)中 P 定义为

$$P = 1 + \omega^2 \cdot \frac{2C_{gs}^2(1 + G_D/g_m + C_D/C_{gs}) + H/g_m^2}{(g_m + G_D)^2} \quad (4)$$

其中 $H = [g_m^2 C_{gs}^2 + G_D^2 C_{gs}^2 + \omega^2 C_{gs}^2 (C_D + C_{gs})^2]$ 。将式(4)代入式(3)得到注入效率公式:

$$\eta_{\text{注入}}(\omega) = \frac{g_m}{g_m + G_D} \cdot \frac{\left\{ 1 + \omega^2 \frac{2C_{gs}^2(1 + G_D/g_m + C_D/C_{gs}) + H/g_m^2}{(g_m + G_D)^2} \right\}^{1/2}}{1 + \omega^2 [(C_D + C_{gs}) / (g_m + G_D)]^2} \quad (5)$$

式(5)是作者导出的 IR-CCD 的注入效率公式,与 Steckl 推导的注入效率公式^[2]

$$\eta_{\text{注入}}(\omega) = \frac{g_m}{g_m + G_D} \cdot \frac{\left\{ 1 + \omega^2 \frac{2C_{gs}^2(1 + G_D/g_m) + H/g_m^2}{(g_m + G_D)^2} \right\}^{1/2}}{1 + \omega^2 [(C_D + C_{gs}) / (g_m + G_D)]^2} \quad (6)$$

相比,可以发现式(5)比式(6)多 C_D/C_{gs} 项,作者认为此项是不应忽略的。可以证明, C_D/C_{gs} 与 G_D/g_m 、或与其它项相比,要大一个数量级,至少也有相同的数量级。例如,取红外探测器的典型参数值为 $G_D = 200 \mu\Omega^{-1}$ 、 $C_D = 20 \text{ pF}$,而 CCD 在 77 K 下,输入抽头的典型参数值为 $g_m = 500 \mu\Omega^{-1}$ 、 $C_{gs} = 1 \text{ pF}$,可算得 $C_D/C_{gs} = 20$ 、 $G_D/g_m = 0.4$ 。由此可见, C_D/C_{gs} 项远大于 C_D/g_m 项。所以,在式(6)的 $(1 + G_D/g_m + C_D/g_m)$ 项中,没有忽略 G_D/g_m 项,反而忽略了 C_D/C_{gs} 项,这是没有理论根据的。我们认为有必要将式(6)按式(5)的形式进行修正。

三、注入效率分析

我们对注入效率随频率的变化关系作如下分析:

(1) 当 $\omega \rightarrow 0$ 时,由式(5)可得

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \eta_{\text{注入}}(\omega) = \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_D} \quad (7)$$

此时 $g_m R_D$ 的值较大,即 $g_m R_D \gg 1$,式(7)变成 $\eta_{\omega}(0) = 1$,可见 $\eta_{\text{注入}}(0) \rightarrow 1$ 时能得到较高的注入效率。

(2) 当频率在 1 MHz 范围内,并且光子探测器性能较好时,可由式(5)得到注入效率

$$\eta_{\text{注入}}(\omega) = \frac{\eta_{\text{注入}}(0)}{1 + \omega^2 [(C_D + C_{gs}) / (g_m + G_D)]^2} \quad (8)$$

式中 $\eta_{\text{注入}}(0) = g_m / (g_m + G_D)$ 。当频率增高时, $\eta_{\text{注入}}(\omega)$ 随 ω 增大而衰减,将 $\eta_{\text{注入}}(\omega)$ 对 ω 求导,可得

$$\eta_{\text{注入}}(\omega) = (1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{-1/2} \quad (9)$$

式中 $\tau = (C_D + C_{gs}) / (g_m + G_D)$ 。可见,注入效率与频率有关。IR-CCD 的光学调制频率不能过高,否则,注入效率将随频率增大而衰减,这样就限制了探测器列阵的光扫描速度。因此,在实际应用中规定 $\omega = \frac{1}{\tau}$ 为最大允许光学调制频率,即 $f_{\text{max}} = (1 + g_m R_D) / 2\pi R_D C$,其中 $C = C_D + C_{gs}$ 。

(3) 高频时, $\omega \rightarrow \infty$,由式(5)可得

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \eta_{\text{注入}}(\omega) = \eta_{\text{注入}}(\infty) = C_{gs} / (C_D + C_{gs}) \quad (10)$$

我们使用前述的典型参数值,代入式(10),得到 InSb-CCD 低频工作时 $\eta_{\text{注入}}(\omega)=0.048$; 高频工作时 $\eta_{\text{注入}}(\omega)=0.714$ 。也就是说,InSb-CCD 的漏电导要小,CCD 的跨导也要小,才能获得最佳注入效率。

(4) 在饱和区,跨导为^[8]

$$g_m = \left[\frac{2Z\mu_e C_i i_D}{L} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

式中 Z 为 CCD 沟道宽度, L 为 CCD 的电极长度, μ_e 为电子迁移率, C_i 为绝缘体单位面积电容。由式(11)可知,当注入电流减小时, g_m 也随之减小,使 $\eta_{\text{注入}}$ 也减小,即 $\eta_{\text{注入}}$ 与 g_m 之间存在迭代效应。此外, g_m 与输入抽头电路纵横比成正比,而 C_{gs} 与源扩散区和输入极之间的重叠面积和绝缘层的厚度有关。

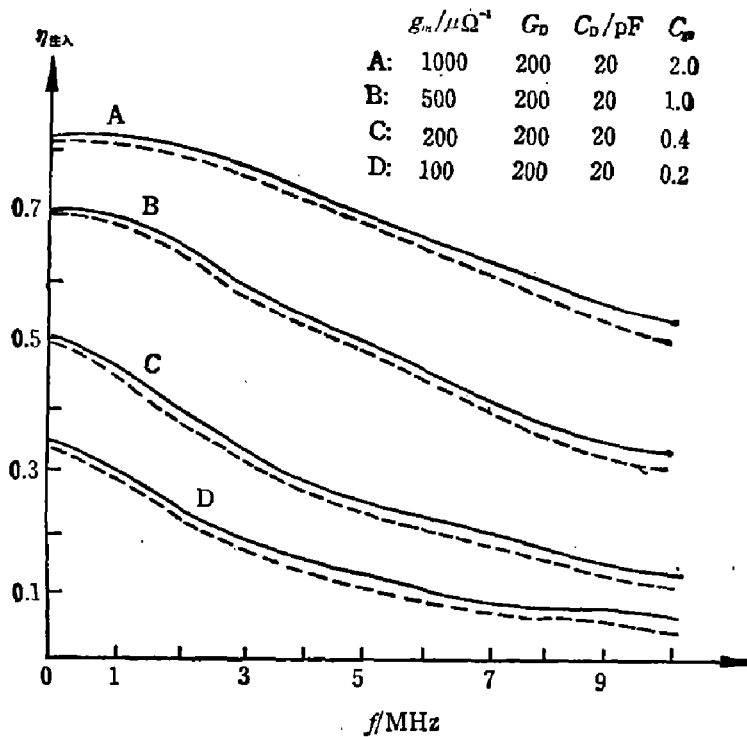


图 2 输入抽头纵横比不同时注入效率随频率的变化曲线

Fig. 2 Injection efficiency vs frequency, for the different aspect ratio of the input pin

由于红外探测器的 C_D 远大于 C_{gs} , 所以增大输入抽头电路的宽度来改进跨导不会对总电容产生影响。当改变输入抽头沟道宽度时,得到 CCD 输入电路参数不同值的注入效率随频率变化的关系曲线如图 2 所示(图中实线对应式(5)、虚线对应式(6))。由图 2 可以看出,当参数相同时,式(5)与式(6)存在着差异。在低频时差异较小,高频时差异较大。

四、注入效率与典型参数的计算机分析

为了说明红外探测器与 CCD 输入电路参数对注入效率与频率的关系,本文利用有关文献提供的典型参数,分别代入式(5)、(6),用计算机计算了注入效率随频率的变化曲线。图 2 中的曲线对应于输入抽头电路宽度产生的 CCD 输入电路不同参数值,因此,输入电路的纵横比和总面积都是变化的,这样就同时影响 g_m 和 C_{gs} 。曲线 A 适用于 $Z/L=20$,由此得

到 $g_m = 100 \mu\Omega^{-1}$ 、 $C_{gs} = 2 \text{pF}$ ，因为这时 $\eta_{\text{注入}}$ 较高，达 83%，故所得到的注入电流大，最小读取频率上升到 1.66 MHz。如果将 CCD 用于电视兼容的串行扫描焦平面，频率为 5 MHz 时，曲线 B 的 $\eta_{\text{注入}}$ 为 27%，曲线 COD 的则更低。图 2 还表明工作频率越低，注入效率也越低。一般来说，注入效率不能低于 50% 才能达到实用水平。显然，其纵横比不应小于 10，才能获得较高的注入效率。

图 3 表示红外探测器电容值不同时注入效率的变化(图中实线对应于式(5)、虚线对应于式(6))。从图 3 可以看出，电容值变化时， g_m 随 G_D 的增大而增大。曲线 B 的值下降到原值的一半，最佳工作频率下降一半，此时注入效率为 74.3%。当探测器的电容增大，工作频率在 0~10 MHz 范围内，其注入效率愈来愈小，衰减速度也越来越慢。因此，当工作频

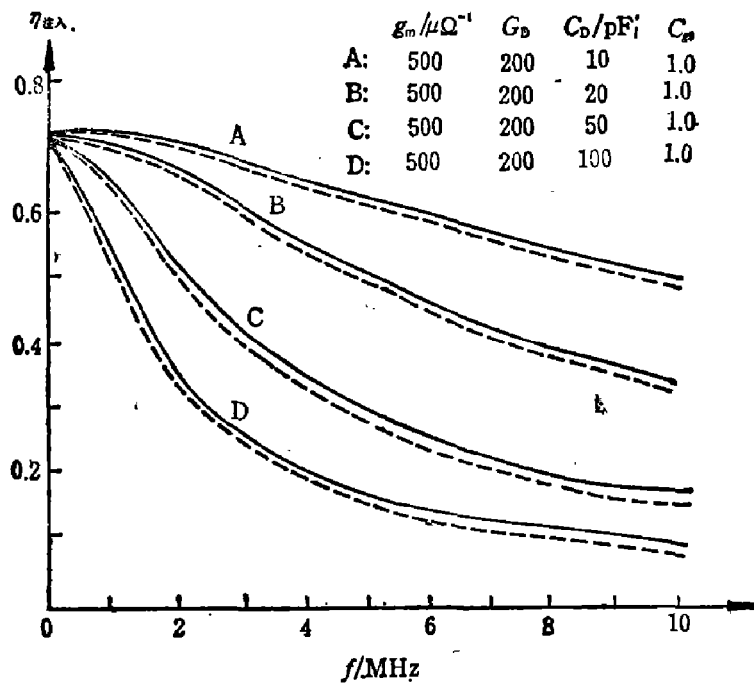


图 3 探测器电容不同时注入效率随频率的变化曲线

Fig. 3 Injection efficiency for the different capacitance of detectors

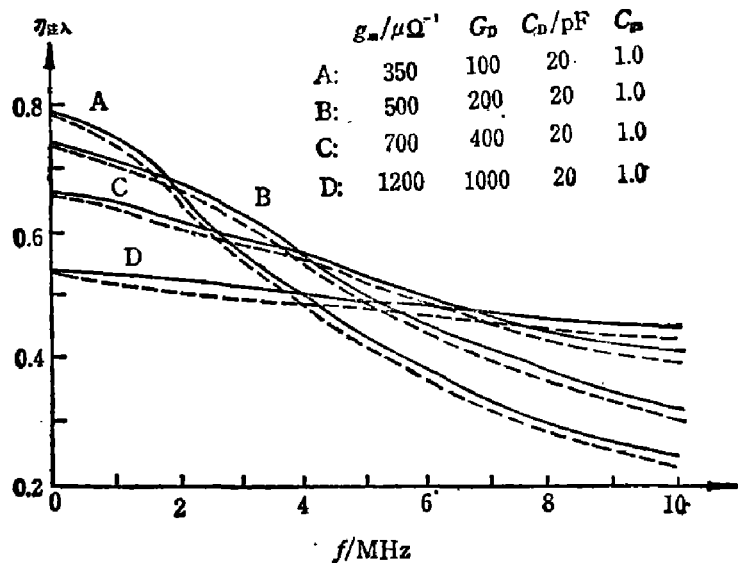


图 4 探测器电导不同时注入效率随频率的变化曲线

Fig. 4 Injection efficiency vs frequency for the different conductance of detectors

率过低时,采用电导较高的探测器为宜。

图 4 表示探测器电导值不同时,注入效率随频率的变化(图中实线对应式(5)、虚线对应式(6)),图中曲线 B 仍与图 2、3 中的曲线一致。从曲线 A 和 B 可以看出,在探测器电导很小的情况下,频率较低时,探测器的电导变化对注入效率影响很小。曲线 B 的读取频率为 1.427 MHz 时,注入效率为 71.3%。曲线 A 的读取频率为 1.428 MHz 时,注入效率为 71.4%,在最佳工作频率时仅提高 0.07%。但在高频时,情况发生了明显的变化,这是由于电导变化引起的。当频率为 5 MHz 时,A、B 两条曲线的注入效率几乎相差一倍。探测器电导变化很大时,探测器性能恶化,此时 $\eta_{注入}$ 显著降低。

五、结 论

以上分析表明,当探测器的电容减小时,注入效率增大,而 CCD 输入电路的跨导增大时注入效率也增大。在其它参数不变的情况下, C_D 增大有利于红外 CCD 的高频特性,而 CCD 输入抽头电容 C_{in} 一般很小,对注入效率影响不明显。理论分析还表明: C_D 、 C_{os} 的取值应尽可能小,而提高红外探测器的动态电阻 R_D 和增大 CCD 输入电路的跨导则是提高 CCD 注入效率的关键参数。

参 考 文 献

- [1] Tracy J. M., *Hybrid Focal Plane Construction and Operation*, in proc. *IBIS Speciality Group On Infrared Detectors*, San Diego, 1976.
- [2] Stell A. J., *Injection efficiency in Hybrid IR-CCD*, in proc. *CCD Application Conference*, San Diego, 1975.
- [3] Sec S. M., *Physics of semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, New York, 1969.

A THEORETICAL ANALYSIS OF INJECTION EFFICIENCY FOR IR-CCD

Chen Dongbo

(Department of Engineering Optics, Peking Institute of Technology)

ABSTRACT

The formula of injection efficiency for hybrid IR-CCD in direct injection mode is derived and compared with Steckl's.