

直接注入混成红外 CCD 输入等效电路

雷 绍 南

(华中工学院光学系)

摘要——本文讨论直接注入混成红外 CCD 的输入等效电路,提出了红外 CCD 有效注入效率的概念。着重分析了红外光伏二极管反偏结电容、CCD 输入栅的栅-源电容和存储栅的势阱负载电容对混成红外 CCD 的注入和工作频带的影响。

一、引 言

硅的电荷耦合器件(CCD)和电荷注入器件(CID)在可见光、近红外波段范围内,可做成理想的面型固体摄像器件。它的小型、轻便,以及在信号处理和电扫描技术等方面的优点,对红外系统工程有着很大的吸引力。所以,近些年来对 CCD 和 CID 在波长较长的红外波段方面的应用作了不少探索,已经发展了单片红外 CCD^[1]和混成红外 CCD^[2]两种器件。单片红外 CCD 既有探测信号,又有处理信号的功能,它将是新一代红外器件发展的方向,但目前还很不成熟。在混成红外 CCD 中,性能良好的红外探测器列阵和成熟的硅 CCD 列阵相连接,就能做成红外焦平面器件,工艺简单易行,成为目前国内外关注的研究课题。

混成红外 CCD 分为间接注入和直接注入两种型式。间接注入混成红外 CCD 一般是在红外探测器和硅 CCD 之间加一个缓冲级,但工艺非常复杂,不易实现。有时也可不用缓冲放大电路,而以红外探测器作信号源,采用不同的偏置条件^[3],得到下列四种不同的注入方法:栅电流输入法;源电流输入法;输入栅截止法;表面势平衡输入法。但用这些输入方法作并联、串联、串并联等焦平面凝视列阵扫描系统时,偏置较复杂,接点较多,工艺上难以实现,故一般较少采用。

本文主要讨论红外光伏二极管和 CCD 输入二极管并联直接注入的输入电路,以及这种输入方法的注入效率响应和高频工作极限。

二、直接注入混成红外 CCD 输入等效电路

直接注入混成红外 CCD 结构示意图和转移脉冲电压波形如图 1 所示。其中, D 为红外光伏二极管, S 为 CCD 输入二极管, G_1 为 CCD 输入栅, G_2 为 CCD 存储栅。向存储栅注入信号电荷时,单位面积上等效的势阱电容为 $C_w = C_{ox} + C_d$ ^[5]。为了使信号电荷能注入到

本文 1981 年 7 月 8 日收到。修改稿 1981 年 10 月 22 日收到。

OCD 存储栅 G_2 的势阱电容中去, 通常在输入栅 G_1 上加一直流偏压 E 。当 $E=0$ 时, OCD 处于截止状态, 红外光伏二极管注入到 OCD 中的电荷从输入二极管 S 中漏掉。当偏压 $|E| > |V_T|$ 时, OCD 输入栅 G_1 下的表面由耗尽到反型, 而形成 P 沟。在一定工作条件下, 偏压 E 使输入二极管 S 的结面延伸到整个输入栅 G_1 下的沟道, 并使它反偏。同时也使红外光伏二极管 D 也处于反偏的工作状态。当存储栅 G_2 受时钟脉冲 ϕ_1 作用时, OCD 的输入二极管 S、输入栅 G_1 和存储栅 G_2 下的界面形成一个衬底接地的共栅极 MOS 管^[4, 5]。MOS 管的源极与一个被调制的红外光伏二极管相连。而漏极与一个取样频率为 $f_s = \frac{1}{T_s}$ 的脉冲开关 $K(\omega_s)$ 以及由脉冲开关所形成的势阱容抗负载 (其值为 $\frac{1}{\omega_s C_L}$) 相串联。本文作交流小信号分析。

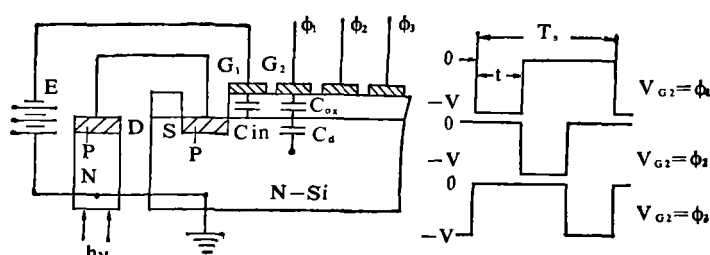


图1 直接注入混成红外 CCD 结构和转移脉冲电压波形

红外光伏二极管和 OCD 混成后的输入等效电路可用图 2 表示。其中, \dot{V}_D 为红外光伏二极管调制电压源; R_D 和 C_D 为红外光伏二极管反偏状态下的动态电阻和电容; g_0 为衬底接地共栅 MOS 管输入栅的跨导, $g_0 = g_m + g_{mb}$, g_m 是输入栅正面栅跨导, g_{mb} 是“背栅”跨导^[5]; C_{gs} 为输入栅氧化层电容 C_{in} 、输入二极管 S 反偏的结电容和输入栅沟道的耗尽电容之和; C_L 为存储栅总势阱电容 AC_w , A 为存储栅的面积; C_{ds} 为栅-漏电容, 对于 OCD 一般很小, 可以忽略; R_{ds} 为 OCD 输入栅饱和漏电阻, 一般较大, 但作用很小, 本文中亦予以略去。

基于以上分析, 并将图 2 中红外光伏二极管的电压源等效于电流源, 则直接注入混成红外 OCD 输入等效电路可简化为图 3。其中, \dot{I}_D 为红外二极管调制的电流源, $\dot{I}_D = (G_D + j\omega C_D)\dot{E}_s$; $g_0\dot{E}_s$ 为输入电流源; $G_D = \frac{1}{R_D}$ 为红外光伏二极管的动态电导; $C_D + C_{gs}$ 为红外 OCD 输入电容。

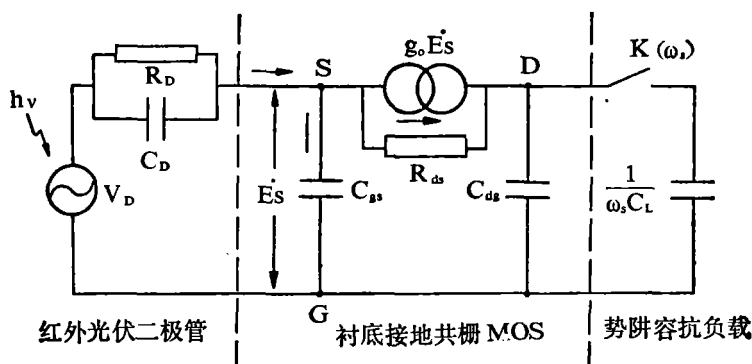


图2 红外光伏二极管和硅 CCD 混成的输入等效电路

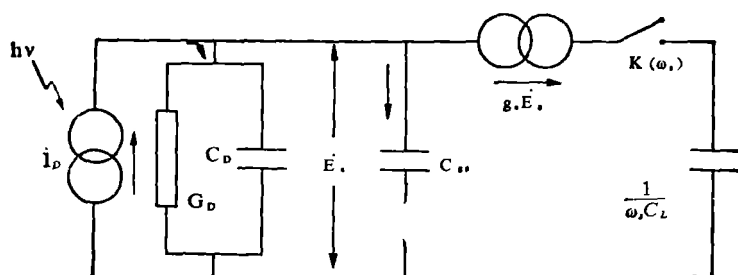


图3 直接注入混成红外 CCD 输入等效电路

通常, 时钟脉冲 ϕ_1 的取样频率 ω_s 比较高, 负载容抗和输入电流源内阻抗相比为很小, 所以在讨论直接注入混成红外 CCD 电流注入时可认为负载容抗短路。

三、有效注入效率响应

根据图3的等效电路, 电流源向红外光伏二极管和 CCD 注入的电荷, 按文献[6], 其注入效率为:

$$\eta = \left| \frac{g_0 + j\omega C_{gs}}{(G_D + g_0) + j\omega(C_D + C_{gs})} \right|$$

$$= \frac{g_0}{g_0 + G_D} \cdot \frac{\sqrt{\left[1 + \omega^2 \left(\frac{C_{gs}}{g_0}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \omega^2 \left(\frac{C_D + C_{gs}}{G_D + g_0}\right)^2\right]}}{\left[1 + \omega^2 \left(\frac{C_D + C_{gs}}{G_D + g_0}\right)^2\right]}, \quad (1)$$

$$\text{当 } \omega \rightarrow 0 \text{ 时,} \quad \eta(0) = \frac{g_0}{g_0 + G_D}, \quad (2)$$

$$\text{当 } \omega \rightarrow \infty \text{ 时,} \quad \eta(\infty) = \frac{C_{gs}}{C_D + C_{gs}}. \quad (3)$$

作者认为, 在注进 CCD 的电流中只有注入到负载电容 C_L 中的电流 $g_0 \dot{E}_s$ 才是真正有用的。因此, 可以提出“有效注入效率”的概念。它应是注入效率 η 与“有效系数 $(g_0 / (g_0 + j\omega C_{gs}))$ ”的乘积。故有效注入效率响应的表示式为

$$\eta_{eff} = \eta \cdot \left| \frac{g_0}{g_0 + j\omega C_{gs}} \right| = \left| \frac{g_0}{(G_D + g_0) + j\omega(C_D + C_{gs})} \right|$$

$$= \frac{g_0}{G_D + g_0} \cdot \frac{\sqrt{1 + \omega^2 \left(\frac{C_D + C_{gs}}{G_D + g_0}\right)^2}}{1 + \omega^2 \left(\frac{C_D + C_{gs}}{G_D + g_0}\right)^2}, \quad (4)$$

$$\text{当 } \omega \rightarrow 0 \text{ 时,} \quad \eta_{eff}(0) = \frac{g_0}{G_D + g_0}, \quad (5)$$

$$\text{当 } \omega \rightarrow \infty \text{ 时,} \quad \eta_{eff}(\infty) = \frac{g_0}{\omega(C_D + C_{gs})}. \quad (6)$$

由式(2)和式(5)可以看出: 在低频时, 注入效率 η 和有效注入效率 η_{eff} 是一致的。它们都随着 CCD 输入栅跨导 g_0 增大而增大, 同时随红外光伏二极管反偏状态下的电导 G_D 的增大而减小。

比较式(3)和式(6), 注入效率 η 在高频时趋近一个极限值 $C_{gs}/C_D + C_{gs}$, 而有效注入效率 η_{eff} 则随频率增大而很快地趋近于零。

图 4 和图 5 是采用不同的红外光伏二极管参数和 CCD 输入电路参数计算的注入效率

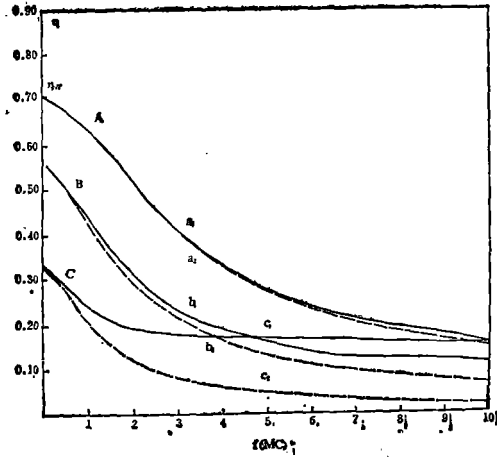


图 4 不同的输入跨导和栅-源电容下
注入效率和频率的关系
—— 为注入效率, --- 为有效注入效率

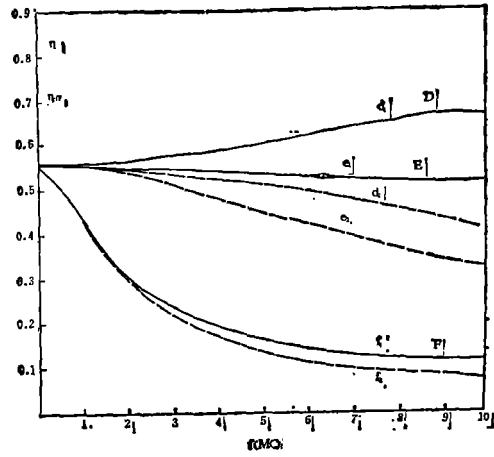


图 5 不同的红外光伏二极管动态电
容下注入效率和频率的关系
—— 为注入效率, --- 为有效注入效率

η 和有效注入效率 η_{eff} 的频率特性曲线。图 4 是对应于一组红外光伏二极管参数 ($G_D = 200 \mu\text{S}$, $C_D = 50 \text{ pF}$) 与三组不同 CCD 输入跨导和栅-源电容参数的曲线, 其中 A 组: $g_0 = 500 \mu\text{S}$, $C_{gs} = 1 \text{ pF}$; B 组: $g_0 = 250 \mu\text{S}$, $C_{gs} = 5 \text{ pF}$; C 组: $g_0 = 100 \mu\text{S}$, $C_{gs} = 10 \text{ pF}$ 。图中实线 a_1 、 b_1 、 c_1 为注入效率频率特性曲线, 虚线 a_2 、 b_2 、 c_2 为有效注入效率频率特性曲线。图 4 表明, 栅-源电容使有效注入效率下降, 其下降程度随着栅-源电容 C_{gs} 增大和频率上升而愈加明显。

图 5 是对应于一组 CCD 输入跨导和栅-源电容参数 ($g_0 = 250 \mu\text{S}$, $C_{gs} = 5 \text{ pF}$) 与三组不同的红外光伏二极管动态电容参数的曲线, 其中 D 组: $G_D = 200 \mu\text{S}$, $C_D = 1 \text{ pF}$; E 组: $G_D = 200 \mu\text{S}$, $C_D = 5 \text{ pF}$; F 组: $G_D = 200 \mu\text{S}$, $C_D = 50 \text{ pF}$ 。从图 5 可看出: 当频率趋于零时, 电荷注入均一致; 在高频区, 由于混成红外 CCD 输入电容 ($C_D + C_{gs}$) 减小而注入增大。当频率趋于无穷大时, 注入效率 (以实线 d_1 、 e_1 、 f_1 表示) 依次分别为 83%、50%、9%; 而有效注入效率 (以虚线 d_2 、 e_2 、 f_2 表示) 均下降至零。

四、直接注入混成红外 CCD 高频增益响应

上面讨论了混成红外 CCD 的输入电容对注入频响的影响。本节讨论混成红外 CCD 输出负载电容对频响的影响。当输出负载电容 $C_L < C_D + C_{gs}$ 时, 混成红外 CCD 的工作频带范围将由有效注入效率频响决定。当 $C_L > C_D + C_{gs}$ 时, 根据图 3, 其高频的增益响应近似为:

$$A(\omega) = \left| \frac{g_0 \dot{E}_s}{j\omega_s C_L \dot{E}_s} \right| = \frac{g_0}{\omega_s C_L} \quad (7)$$

根据式(7), 混成红外 CCD 高频增益频响低于有效注入效率频响。这就限制了混成红

外 CCD 高频工作频限^[7]。

目前国内外的 CCD 多数是多层多晶硅栅。本文针对二相硅铝交迭栅进行讨论。其结构、尺寸和电学参数如下：输入栅是厚氧化层，栅厚约 1500 Å，栅宽约 200 μm，沟长约 20 μm；存储栅为薄氧化层，栅厚约 700 Å，栅宽约 200 μm，沟长约 40 μm。按近似计算，CCD 的栅-源电容 C_{gs} 约 1 pF；存储栅的势阱电容 C_L 约为 5 pF；输入栅跨导近似为 500 μU。

我们在第二节中曾指出，红外光伏二极管是处在反偏压下工作的。据文献[8]报道：碲镉汞材料采用化学计量偏离法制备 8~14 μm 光伏二极管，其光敏面积为 $4 \cdot 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2$ ，工作温度为 77 K。当反向偏压为 0.1 V 时，二极管的结电容为 8 pF，频率达 1 GHz 时响应仍平坦；当反向偏压 1.5 V 时，结电容下降为 1 pF，截止频率达 3 GHz。由于它的雪崩击穿电压在 2.5 V 左右，故反偏电压可增加，结电容可进一步减小，截止频率可达 10 GHz。采用等温蒸发-扩散外延方法制备的碲镉汞光伏二极管，光敏面积为 $2.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ ，在 70 K~130 K 时零偏结电容为 60 pF；而反偏为 0.4 V 时，结电容下降到 1.2 pF，其时间常数小于 1 ns。碲锡铅材料，由于介电常数高达 560，其光伏二极管的结电容一般为 $0.5 \sim 2.6 \cdot 10^6 \text{ pF/cm}^2$ ，时间常数为 20~100 ns。若反偏 0.1 V，结电容仅为 $0.01 \cdot 10^6 \text{ pF/cm}^2$ ，截止频率可达 1 GHz。用液相外延低载流子浓度材料制备成 pin 结碲锡铅光伏二极管，结电容小于 $0.06 \cdot 10^6 \text{ pF/cm}^2$ ，截止频率可达 400 MHz，若反向偏置，可达 1 GHz。

以上两种材料制成的光敏面积为 10^{-4} cm^2 数量级的红外光伏二极管，其探测率 D^* 可达背景极限水平，响应时间也很短，但反偏的动态电阻仅为几十至几百欧姆，反偏的结电容为 0.2 pF 到 2 pF。为了计算频带响应，我们把红外光伏二极管动态电导取为 $G_D = 3500 \mu\text{U}$ ，把动态电容取为 $C_D = 1 \text{ pF}$ ，和二相硅铝交迭栅的 CCD 相互混成。按式(4)和式(7)计算，可得到图 6 中的有效注入效率 η_{eff} (虚线)和高频增益曲线 $A(\omega)$ (实线)。曲线表明，在 0~800 MHz 频率范围内，有效注入效率 η_{eff} 从 12.5% 下降到 3.5%。由于高频增益 $A(\omega)$ 的限制，混成红外 CCD 只能工作在 100 MHz 以下的频率范围内。此外，对于 CCD 时钟脉冲频率 ω_s 的选取，既要考虑信号频率的电荷注入量，还要注意取样信号不失真。为使信号不失真，CCD 的工作频宽只能小于取样脉冲频率的一半 $\left(\frac{\omega_s}{2}\right)$ 。所以，目前 CCD 的工作频宽通常小于 10 MHz 以下。

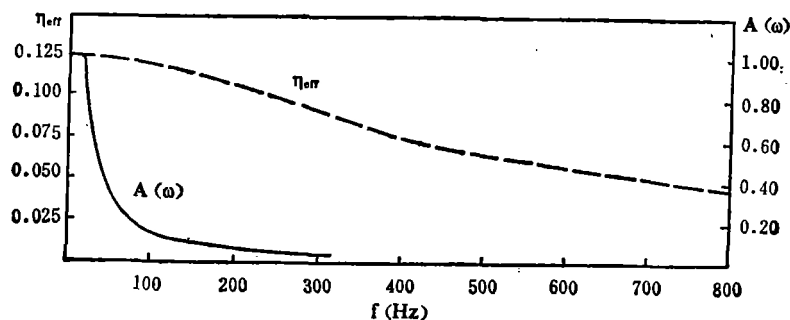


图 6 混成红外 CCD 的有效注入效率和高频增益响应

五、结 论

直接注入混成红外 CCD 的输入等效电路中应包含势阱电容的负载,注入到这个电容中的电荷才是真正有用的。同时,它将影响红外 CCD 的工作频带。为了提高有效注入效率,需要增大 CCD 输入跨导和减小红外光伏二极管反偏的动态电导。为了增加频宽,应尽量选取较小反偏结电容的红外光伏二极管,减小 CCD 输入栅的栅-源电容和存储栅的势阱电容。

致谢——本文承张守一教授、潘正达等老师提出修改意见,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 野村祐治,涉谷面宽,赤外線技术, (1979), 4, 33~40.
- [2] 瀧川・宏,植田隆一,赤外線技术, (1979), 4, 27~31.
- [3] 雷绍南,红外物理与技术, (1981), 5, 36~41.
- [4] Neudeck G. W. et al., *Manual Two FETS and Linear Amplifier Design*, N. Y.: McGraw Hill, 1978, 41.
- [5] Crawford R. H., *MOSFET in Circuit Design*, 1967 (中译本: 金属-氧化物-半导体场效应晶体管电路设计, 科学出版社, 1971).
- [6] Steckl A. J., *Infrared Phys.*, **16** (1976), 1/2, 65~73.
- [7] Sovin L. J., *Field Effect Transistors*, N. Y.: McGraw Hill, 1965, 54.
- [8] 红外探测器,上海科学技术情报研究所, 1974, 1~34.

THE INPUT EQUIVALENT CIRCUIT OF DIRECT INJECTION HYBRID INFRARED CCD

LEI SHAONAN

(Department of Optics, Huashong (Central China) Institute of Technology)

ABSTRACT

The input equivalent circuit of direct injection hybrid infrared CCD is discussed, and the concept of the effective injection efficiency of hybrid infrared CCD is presented. The effect of the junction capacitance of the reverse-biased infrared photovoltaic diode, the effects of the gate-source capacitance for the input gate, and of the potential well capacitance for the store gate of CCD on the injection and operation frequency responses of hybrid infrared CCD are emphatically studied.