

高频 $C-V$ 方法测量埋沟电荷 耦合器件的沟道电势

崔成烈 傅志煌 吴瑞华

(中国科学院半导体研究所)

81年8月25日收到

提 要

本文提出通过栅控二极管在不同偏压下的高频 $C-V$ 特性曲线，确定埋沟电荷耦合器件(BCCD)随栅压变化的沟道电势。对不同样品进行了高频 $C-V$ 测量，并求出沟道电势与栅压的变化关系。同时，用直流 $I-V$ 法进行了测量，结果与高频 $C-V$ 方法所得到的结果非常接近。根据 BCCD 一维耗尽近似理论模型，进行了计算机模拟，结果表明，理论与实验结果符合得比较好。

一、引言

本文提出用高频 $C-V$ 方法测量埋沟电荷耦合器件(BCCD)的沟道电势。也就是通过栅控二极管在不同偏压下的高频 $C-V$ 特性曲线，确定 BCCD 的沟道电势随栅压变化的关系。确定这一关系对 BCCD 器件的设计、工艺以及功能测量，都能提供可靠的依据，因此是十分重要的。

Mohsen^[1]等人曾经对具有埋层结构的耗尽型 MOS 管进行了详细的分析和测量。他们通过低频 $C-V$ 测量，确定了 BCCD 沟道电势随栅压的变化关系。低频 $C-V$ 技术，除较准确地确定 BCCD 的沟道电势外，还可以测量其他一些参数。但就其确定沟道电势这一项参数而言，可以选择更简单易行的办法。因此，相继提出耗尽型 MOS 管的直流测量等方法^[2,3]。本文则提出用高频 $C-V$ 方法测量 BCCD 沟道电势。我们对几种不同的样品进行了高频 $C-V$ 测量，并求出它们的沟道电势与栅压的关系。同时，采用耗尽型 MOS 管的直流方法进行了测量，结果与高频 $C-V$ 方法测量结果非常接近。不仅如此，我们根据 BCCD 一维理论模型^[4~6]进行了计算机模拟，结果表明，理论与实验结果符合得比较好。因此，我们认为采用高频 $C-V$ 技术确定 BCCD 的沟道电势是切实可行的。

二、测量原理和方法

为了确定 BCCD 的沟道电势，首先要制备与 BCCD 工艺相容的耗尽型 MOS 晶体管，见图 1(a)。该晶体管具有与衬底导电类型相反的埋层。这个埋层是通过离子注入形成

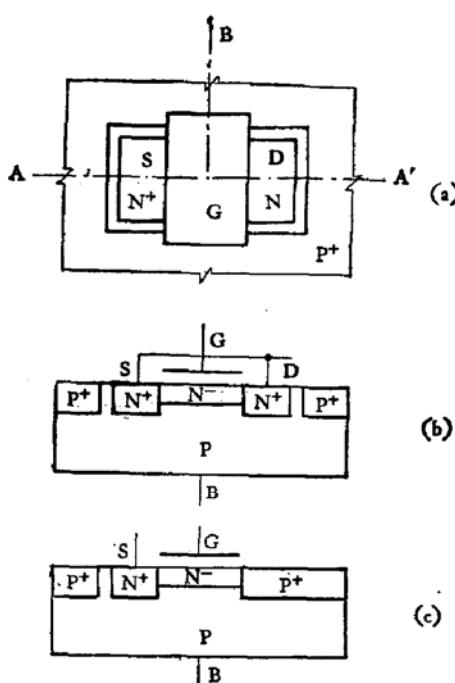


图1 具有埋层的耗尽型MOS晶体管结构
(a) 该晶体管的平面图
(b) 图(a)的AA'剖面图,把源漏短接
(c) 图(a)的AB剖面图

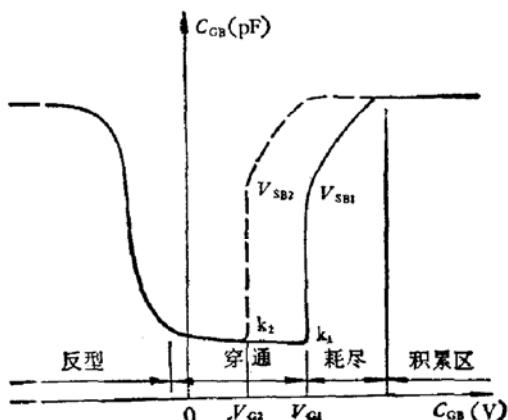


图2 棚控二极管的低频 $C-V$ 曲线,其中包括积累、耗尽、穿通和反型四个区域。曲线中的 K_1 点表示由穿通变为耗尽的拐点。虚线表示偏置电压变为 V_{SB2} 时的 $C-V$ 曲线

的。晶体管的周围像 BCCD 一样制作有沟道截止环。把这种晶体管的源漏短接后构成棚控二极管的形式,见图 1(b) 或 (c)。通过讨论这种棚控二极管的沟道电势与棚压的关系,就可以确定相应 BCCD 的沟道电势与棚压的关系。

根据 Mohsen 等人采用准静态技术测量棚控二极管的低频 $C-V$ 曲线的结果,可把 $C-V$ 曲线分为如图 2 所示的四个区域。即可分为积累、耗尽、穿通和反型四个区域。其中,积累区的低频电容为棚氧化层电容 C_{ox} ,耗尽区的电容为埋层表面耗尽层电容 C_D 和 C_{ox} 的串联。由于穿通区是反映 p-n 结耗尽层和表面耗尽层相联结的情况,因此,穿通区的低频电容为 C_{ox} , C_D 和 C_{p-n} (C_{p-n} 是埋层和衬底之间的 p-n 结电容)的串联电容。在反型区,由图 1(c) 可知,反型层通过 p^+ 区与衬底构成通路,于是反型区电容为 C_{ox} 。

采用低频 $C-V$ 方法确定 BCCD 的沟道电势时,利用了图 2 中的拐点 K_1 ,其中 K_1 点的电容为 C_{min} 。给定一个二极管偏置电压 V_{SB1} ,就有一个 K_1 点,同时, K_1 点对应的棚压为 V_{G1} 。那么,当改变二极管的偏置电压(如变为 V_{SB2})时,就有另一个拐点,即 K_2 点(见图 2),因而也就有 V_{G2} 与 K_2 点对应。棚压和二极管偏置电压这一对应的关系,通过下面的分析变为沟道电势与棚压的关系。

从 BCCD 的一维模型势能图(见图 3)中可以看到,沟道电势 $\phi_{m1} = V_{SB1} + \phi_B$,其中 ϕ_B 为埋层 p-n 结的自建电势。而且,这个 ϕ_m 与棚压 V_G 有关,图 3 中的“A”曲线表示,棚压为 V_{G1} 时沟道电势为 ϕ_{m1} ,而“B”曲线表示棚压为 V_{G2} 时沟道电势为 $\phi_{m2} = V_{SB2} + \phi_B$ 。棚控二极管在低频 $C-V$ 测量中达到穿通状态,意味着埋层全部耗尽。此时它的一维势能图正好是图 3 的情况。低频 $C-V$ 曲线中的 K_1 点对应势能图中的“A”曲线,而 K_2 点对应势能图中“B”的情况。因此知道低频 $C-V$ 曲线中 K_1 点所对应的两个参数 V_{G1} 和 V_{SB1} 以后,就可

以确定栅压 V_{G1} 下的沟道电势 $\phi_{m1} = V_{SB1} + \phi_B$ 。如果改变二极管偏置电压 V_{SB1} 时, 可得到另一组参数, 从而随栅压变化的沟道电势也就可以求出来了。

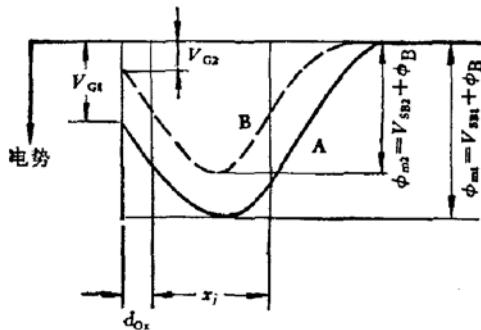


图 3 BCCD 的一维模型势能图。其中“**A**”曲线表明栅压 V_{G1} 对应沟道电势 $\phi_{m1} = V_{SB1} + \phi_B$; 而“**B**”曲线表明栅压变为 V_{G2} 时沟道电势 $\phi_{m2} = V_{SB2} + \phi_B$. x_i 是埋层深度. d_{ox} 为氧化层厚度

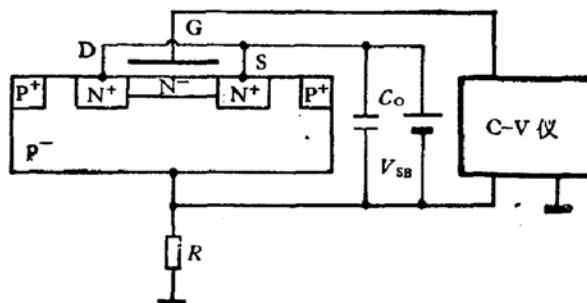


图 4 棚控二极管的高频 $C-V$ 测量框图

如果我们采用高频 $C-V$ 方法测量棚控二极管, 得到类似于低频技术中得到的 $C-V$ 曲线和那些拐点, 而且这些拐点的意义与低频 $C-V$ 曲线中的拐点意义相同, 那么, 我们也可以利用高频 $C-V$ 曲线中的拐点, 确定 BCCD 的沟道电势随栅压的变化关系。于是, 我们对图 1 中的棚控二极管, 按图 4 所示的电路图进行高频 $C-V$ 测量。若把二极管的偏置电路去掉, 使埋层 p-n 结处于浮置状态时, 即使埋层与二氧化硅界面处于积累 ($V_{GB} > V_{FB}$), 但此时的高频电容为 C_{ox} 和 C_{p-n} 的串联电容。这是因为高频电容是通过测量流过样品的高频电流在取样电阻 $R((\omega C_x)^{-1} \gg R)$ 上的电压降而确定的。可是当二极管加反偏时 ($V_{GB} - V_{SB} > V_{FB}$), 由于偏置电源本身对高频短路, 因此积累状态的等效电路, 如图 5(a) 所示。等效电路中的 R_t 为埋层的横向电阻。由于积累状态时 R_t 很小, 所以, 近似认为此时的高频电容为 C_{ox} 。

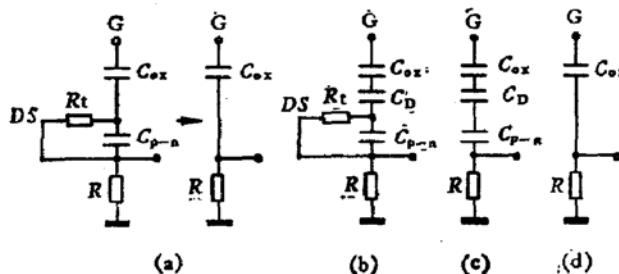


图 5 棚控二极管的高频 $C-V$ 等效电路
(a) 积累 (b) 耗尽 (c) 穿通 (d) 反型

当栅压减小时 ($V_{GB} - V_{SB} \leq V_{FB}$), 埋层表面开始耗尽。等效电路如图 5(b) 所示。此时由于横向电阻 R_t 随着耗尽层加深而变大, 因而不能有效地把 C_{p-n} 短路掉。显然, $C-V$ 曲线上耗尽区的电容为 C_{ox} , C_D , R_t 和 C_{p-n} 的综合效果。

当进一步降低栅压, 使耗尽深度逐渐增加以致于棚控二极管反偏引起的 p-n 结耗尽层与栅压引起的表面耗尽层相联结时, 就达到了穿通状态。由于穿通状态的 R_t 趋于无穷

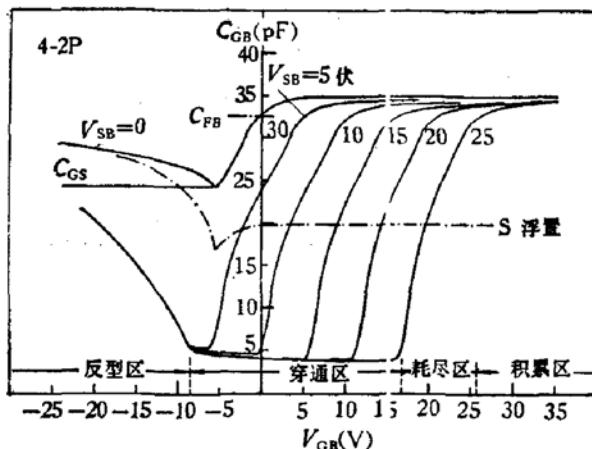


图 6 棚控二极管在不同偏压下的高频 C-V 曲线族。与低频 C-V 曲线一样，包括：积累、耗尽、穿通和反型四个区

大，因而总的高频电容为 C_{ox} 、 C_D 和 C_{p-n} 的串联，见图 5(c)。

同样，继续降低栅压 ($V_{\text{GB}} < V_{\text{FB}}$) 时，由于体内载流子的热产生和 p^+ 区向埋层表面注入空穴，使其界面形成反型层。不过，在高频测量时，R-C 分布网络的影响，使其反型速度比其低频要慢得多。图 6 就是用高频 C-V 方法得到的棚控二极管的 C-V 曲线族。从图 6 可以看到，用高频 C-V 方法同样可以得到类似低频的 C-V 曲线，亦即有积累、耗尽、穿通以及反型四个区域，而且也有从耗尽转变为穿通，并使电容变为最小电容的拐点。这个拐点的最小电容为 C_{ox} 、 C_D 以及 C_{p-n} 的串联电容。因此，我们完全可以像低频情况一样，利用拐点求沟道电势随栅压的变化关系。

三、结 果

我们在衬底浓度为 $2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 P 型(100)硅单晶上，制备了四种具有 n 型埋层的 N 沟硅栅 MOS 晶体管，其长宽比为 $400 \mu\text{m}:400 \mu\text{m}$ 。其中前三种样品是具有三种不同的磷注入剂量，而最后一种样品是与两相 BCCD 的转移区相对应，在磷注入的基础上再进行一次硼注入，但使埋层仍旧是 n 型。对上述四种样品进行 I_D-V_{GS} 转移特性的测量，确定这四种样品的埋层平均杂质浓度和结深。根据 Donalds^[7] 的结果，耗尽型 MOS 管的栅源开启电压 V_{TN} 为：

$$V_{\text{TN}} = V_{\text{FB}} - gN_D X_j \left(\frac{1}{2C_j} + \frac{1}{C_{\text{ox}}} \right) + \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_{\text{ox}}} \right) \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}} q N_A (\phi_B - V_{\text{BS}})} \quad (1)$$

式中 V_{FB} 为平带电压， q 为电子电荷， N_D 为埋层平均杂质浓度， C_j 为半导体埋层电容， $C_j = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}}{X_j}$ ，而 X_j 是埋层深度； N_A 为 P 型衬底浓度。

方程(1)表明 V_{TN} 与 $\sqrt{\phi_B - V_{\text{BS}}}$ 关系曲线的斜率为

$$\left(\frac{1}{C_j} + \frac{1}{C_{\text{ox}}} \right) \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}} q N_A},$$

其截距为

$$V_{FB} = qN_D X_i \left(\frac{1}{2C_i} + \frac{1}{C_{ox}} \right),$$

因此,通过斜率可以求出结深、通过截距可以确定平均杂质浓度 N_D 。图 7 示出 3-1p, 4-2p, 5-1p 以及 4-2B 等四种样品的 $V_{TN} \sim \sqrt{\phi_B - V_{BS}}$ 关系。用高频 $C-V$ 确定 C_{ox} 和栅氧化层厚度。

通过以上测量分析,把我们制备的四种样品的参数列于表 1。

表 1

参数 样品	栅氧化层厚度 $d_{ox}(\mu m)$	埋层深度 $X_i^*(\mu m)$	磷注入剂量 (cm^{-2})	硼注入剂量 (cm^{-2})	埋层平均浓度 (cm^{-3})
3-1p	0.155	0.2	5×10^{11}		2.5×10^{16}
4-2p	0.157	0.5	1.1×10^{12}		2.2×10^{16}
5-1p	0.146	0.5	1.9×10^{12}		3.6×10^{16}
4-2B	0.157	0.4	1.1×10^{12}	3.2×10^{11}	1.9×10^{16}

* 曾用阳极氧化剥层技术证明这个结深是可靠的。

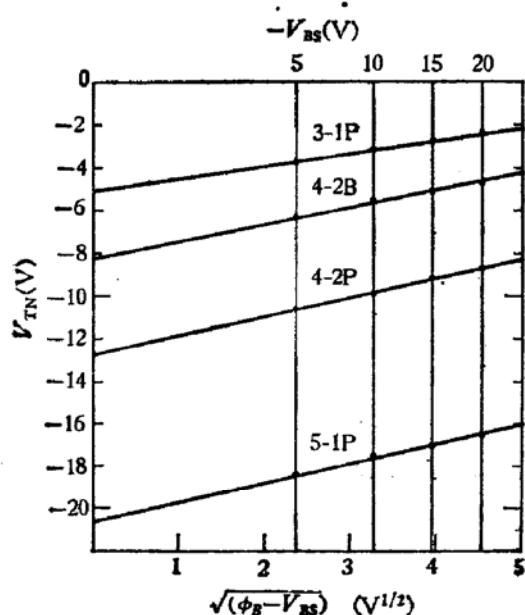


图 7 3-1p, 4-2p, 5-1p 以及 4-2B 等四种样品的 $V_{TN} \sim \sqrt{\phi_B - V_{BS}}$ 关系

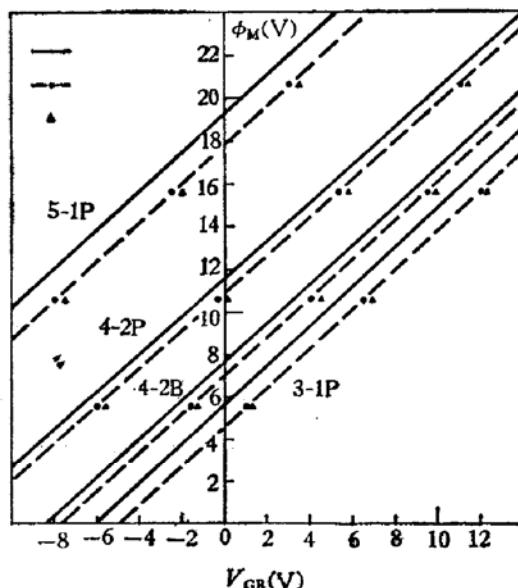


图 8 用高频 $C-V$ 方法测量 BCCD 的 $\phi_m \sim V_G$ 关系

对上述四种耗尽型 MOS 管按图 4 所示的电路,进行高频 $C-V$ 测量。通过四种样品的高频 $C-V$ 曲线族,可确定每个样品的沟道电势随栅压的变化关系。这四种样品的测量结果示于图 8。并且,把耗尽型 MOS 晶体管 I_D-V_{GS} 转移特性^{[2][3]}中求出的 $\phi_m \sim V_{GS}$ 也画在图 8 中。可以看出,二种方法的测量结果非常接近。同时,根据 BCCD 一维理论模型,对这四种样品进行计算机模拟的结果,认为理论和实验符合得相当好(见图 8)。不难看出,理论曲线和实验结果约有 8—10% 的偏离。因为高频 $C-V$ 方法本身带来的误差只有千分之几,所以这种理论和实验的偏离是由于 BCCD 一维模型中假定埋层杂质浓度均匀所

产生的误差。不过为了使理论计算简单易行,作这种假定往往是必要的。尽管如此,理论与实验的符合程度还是令人满意的。

总之,本文明确提出了以高频 C-V 方法测量 BCCD 的沟道电势。基于高频 C-V 技术的成熟性和容易实施,从而决定了我们提出的这一方法不但可靠而且可行。

本工作中所用的样品,由 402 组制备。一室、406、407 组,超净线,109 厂等单位对本工作给予很大的支持和帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. M. Mohsen and F. T. Morris, *Solid-State Electron.*, 18, 407 (1975).
- [2] G. W. Taylor and A. F. Tasch, *Solid-State Electron.*, 20, 473 (1977).
- [3] T. E. Hendrickson, *Solid-State Electron.*, 22, 199 (1979).
- [4] D. J. McKenna, N. L. Schryer and K. H. Valden, *Bell Syst. Tech. J.*, 53, 1581 (1974).
- [5] A. W. Lees and W. D. Ryan, *Solid-State Electron.*, 17, 1163 (1974).
- [6] 崔成烈, 半导体学报, 1, 325 (1980).
- [7] S. Wu Donald, *IEEE Trans.*, ED-27, 995 (1980).

Measurement of BCCD Channel Potential by Means of High Frequency C-V Method

Cui Chenglie, Fu Zhihuang and Wu Ruihua
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

It is proposed to measure the channel potential variations of BCCD depending upon gate voltage by means of the high frequency C-V characteristic curves of a gate control diode under various bias. The results obtained on the relationship between the channel potential and the gate voltage are compared with those obtained with the D.C. I-V method and are found to be approximately the same. A computer simulation indicates that our experimental results are in good accordance with the theoretical curves.