

# BCCD 的一维模型及其数值分析\*

崔成烈

(中国科学院半导体研究所)

## 一、引言

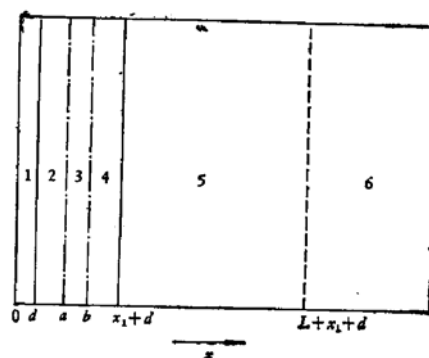
由于埋沟电荷耦合器件(BCCD)具有高速、高传输效率、低噪声等优点而受到人们的重视。国际上已有人对 BCCD 的模型进行了研究。其中 McKenna<sup>[1]</sup> 假定埋层完全耗尽和杂质分布均匀的情况下,求出一维的电势分布。但没有考虑信号电荷。Kent<sup>[2]</sup> 曾考虑过信号电荷,但由于假定埋层中杂质分布是线性的,因而不可能给出解析解。Lees<sup>[3]</sup> 则在假定埋层是均匀杂质分布情况下考虑了信号电荷,因而求出一维电势分布的解析式,不过形式过于复杂,不便分析。作者采用耗尽层近似和均匀杂质分布的埋层以及 Lees 对信号电荷的模型,求出 N 沟、P 沟 BCCD 各区的电势分布,它是一个既简单、又标准的抛物线型电势分布。作者对此结果进行了计算机数值分析,并讨论了沟道的物理深度和几何深度对氧化层厚度的依赖关系;讨论了栅压、埋层深度、杂质浓度以及信号电荷对沟道物理深度的影响。最后讨论了估计信号容量的方法。

## 二、BCCD 的一维电势分布和数值分析

为了求出一维电势分布,把 BCCD 分成如图 1 所示的六个区。

图 1 BCCD 的一维模型

1 区为氧化层区 ( $0 \leq x \leq d$ ), 2 区( $d \leq x \leq a$ )  
和 3 区( $a \leq x \leq b$ ) 以及 4 区( $b \leq x \leq x_1 + d$ )  
为埋层,其中 3 区为信号电荷存贮区, 5 区为  
衬底耗尽区 ( $x_1 + d \leq x \leq L + x_1 + d$ ), 6 区  
为衬底 ( $x \geq L + x_1 + d$ )



定义:

$\phi_{1,2,3,4,5,6}$  分别表示各区的电势

$V_G$  栅压

\* 1979 年 8 月 21 日收到。

$\epsilon_0$  真空电容率

$\epsilon_{0x}$ 、 $\epsilon_s$  分别表示氧化层和硅的介电常数

$N_A$ 、 $N_D$  分别表示 P 型、N 型杂质浓度

$\rho_1$  埋层电荷密度(对 P 沟  $\rho_1 = -qN_A$ ; 对 N 沟  $\rho_1 = qN_D$ )

$Q_s = qN_s$  信号电荷密度,  $N_s$  表示单位面积的信号电荷数

$\phi_m$  沟道电势或沟道的物理深度

$x_m$  表示  $\phi_m$  相应的几何位置

为简化,对上述有关的量进行归一化:

$$\phi_{1,2,3,4,5,6} = \frac{q}{KT} \phi_{1,2,3,4,5,6}; \quad V_0 = \frac{qV_G}{KT};$$

$$\eta = \frac{\epsilon_{0x}}{\epsilon_s}; \quad \sigma = \frac{N_A}{N_D} \text{ (对 P 沟)}, \sigma = \frac{N_D}{N_A} \text{ (对 N 沟)};$$

$$Z = \frac{x}{\lambda_D}, \quad A = \frac{a}{\lambda_D}, \quad B = \frac{b}{\lambda_D}, \quad R = \frac{L}{\lambda_D}, \quad h = \frac{d}{\lambda_D};$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s KT}{q^2 N_D}} \text{ (对 P 沟)}; \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s KT}{q^2 N_A}} \text{ (对 N 沟)}.$$

根据 Lees 的假设和有关边界条件,求解各区的泊松方程,得到如下 P 沟、N 沟的归一化解:

$$\phi_1 = \frac{1}{\eta} [\sigma \cdot \Delta \pm (R - \sigma Z_1)] Z + V_0 \quad 0 \leq Z \leq h \quad (1)$$

$$\phi_2 = \pm \frac{1}{2} \sigma (Z - A)^2 + \phi_m \quad h \leq Z \leq A \quad (2)$$

$$\phi_3 = \phi_m = \mp \frac{1}{2} R^2 \left(1 + \frac{1}{\sigma}\right) \quad A \leq Z \leq B \quad (3)$$

$$\phi_4 = \pm \frac{1}{2} \sigma (Z - B)^2 + \phi_m \quad B \leq Z \leq (Z_1 + h) \quad (4)$$

$$\phi_5 = \mp \frac{1}{2} [Z - (h + Z_1 + R)]^2 \quad (Z_1 + h) \leq Z \leq (R + Z_1 + h) \quad (5)$$

$$\phi_6 = 0 \quad Z \geq (R + Z_1 + h) \quad (6)$$

式中

$$A = -\frac{1}{\sigma} [R - \sigma(h + Z_1) + \sigma \cdot \Delta] \quad (7)$$

$$B = A + \Delta, \quad \Delta = \frac{-Q_s}{\rho_1 \lambda_D} \quad (8)$$

$$R = -\left(\frac{h}{\eta} + Z_1 - \Delta\right) + \sqrt{(1 + \sigma)\left(\frac{h}{\eta} - \Delta + Z_1\right)^2 - \sigma\left(\frac{h}{\eta}\right)^2 \mp 2V_0} \quad (9)$$

一般规定

$$Z_m = \frac{1}{2} (A + B). \quad (10)$$

凡遇“ $\pm$ ”(或“ $\mp$ ”号)时,上边符号代表 P 沟。

根据上述的结果,得出 P 沟 BCCD 中  $\phi_m$ 、 $x_m$  与  $d$  的关系. 如图 2 所示,  $\phi_m$  与氧化层厚度的关系几乎是线性的;随着  $d$  的增加  $\phi_m$  增加,这与 SCCD (表面沟) 情况相反.

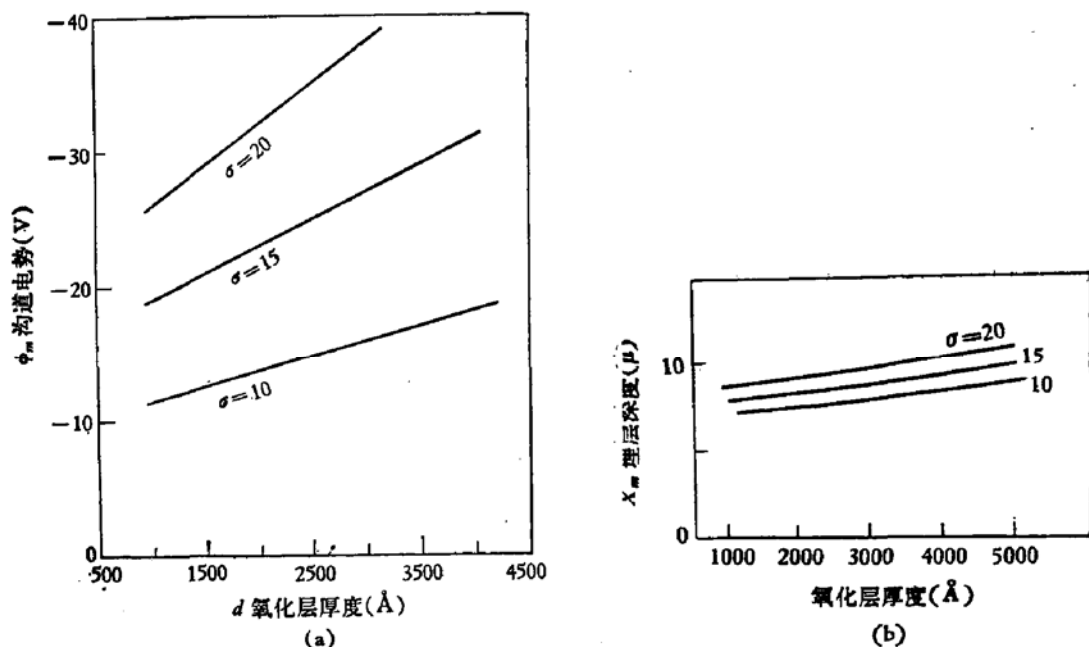


图2 P 沟 BCCD 中 a)  $\phi_m \sim d$  的关系, b)  $x_m \sim d$  的关系  $x_1 = 2\mu$ ,  $Q_s = 0$ ,  $V_G = 0$  和  $N_d = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  以及  $\sigma = 10, 15, 20$

图 3 表示 N 沟 BCCD 中  $\phi_m \sim V_G$  的关系. 显然,对 N 沟 BCCD 而言,  $V_G$  可取一定范围的负值;同样对 P 沟而言,  $V_G$  可取一定范围的正值. 如果固定注入剂量 (控制埋层浓度), 注入深度  $x_1$  有所变化时,  $\phi_m$  的变化不很显著,可参看图 4.

由式 (1)~(9), 计算得到信号电荷改变时的 BCCD 的一维电势分布曲线,如图 5 所示. 当信号电荷改变时整个曲线有明显的下降,但都遵循抛物线规律. 而且随着  $N_s$  的增加  $\phi_m$ ,  $\phi_s$  (表面势) 有明显降低,其结果示于图 6. 当  $\phi_s(N_s) = \phi_m(N_s)$  时意味着势阱被填满,此时把  $N_s$  称为最大信号容量. 但是考虑到表面态的影响,规定  $|\phi_s(N_s) - \phi_m(N_s)| \leq 10$ . 当然在实际器件中估计信号容量时,还要考虑另一个条件: 相邻电极之间的势垒高度差

$$\Delta H = \frac{Q_s}{C_{eff}}, \text{ 其中 } C_{eff} = \left( \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{沟道}} \right)^{-1}; C_{沟道} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{x_m}.$$

因此,同时满足上述两个条件的  $N_s$  为该器件的信号容量.

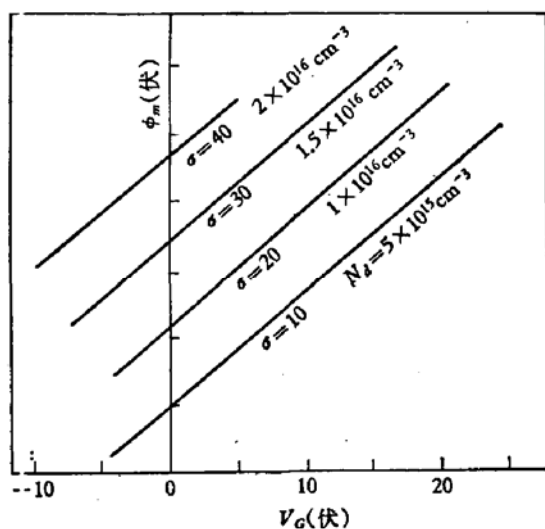
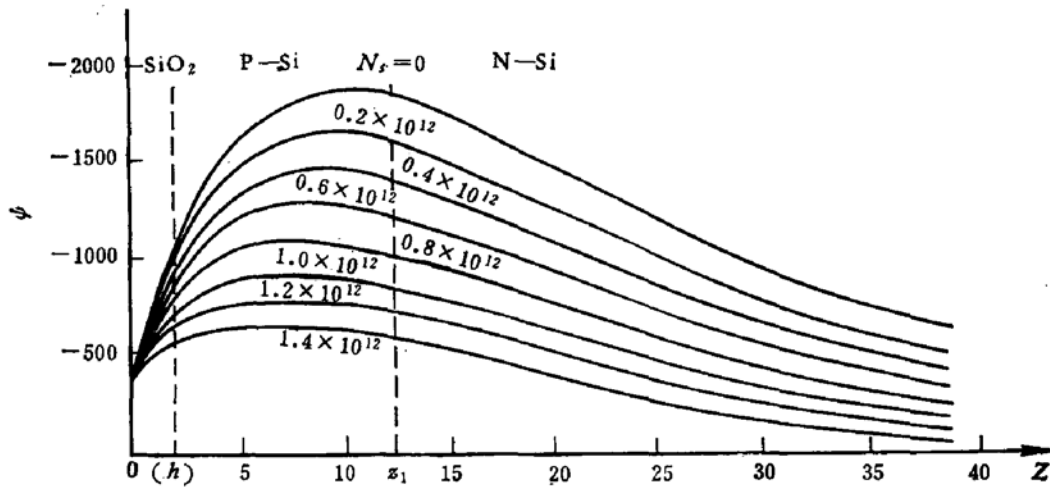
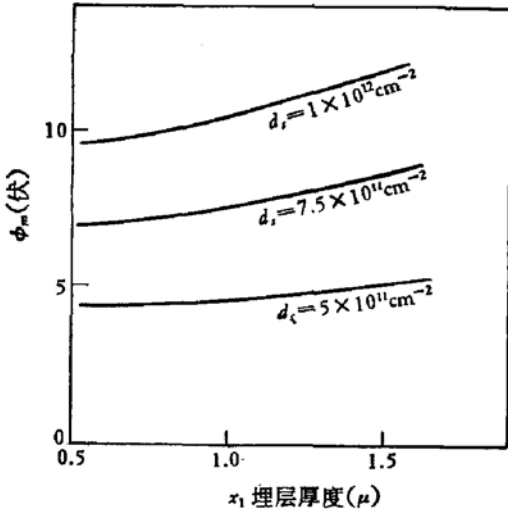


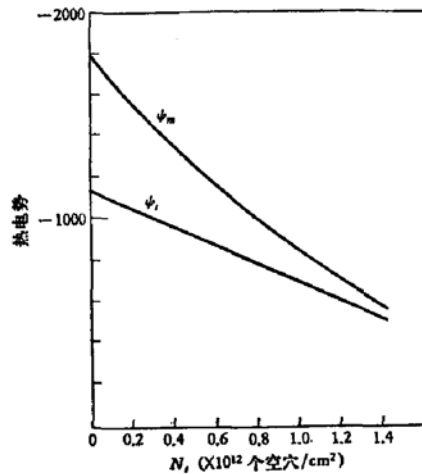
图3 N 沟 BCCD 中  $\phi_m \sim V_G$  的关系  $x_1 = 1\mu$ ,  $d = 0.15\mu$ ,  $Q_s = 0$ ,  $N_A = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $\sigma = 10, 20, 30, 40$  (纵轴每格为 5V)

图5 P沟 BCCD 中  $\psi \sim Z$  的关系

$h = \frac{0.3\mu}{\lambda_D}, \sigma = 20, Z_1 = \frac{2\mu}{\lambda_D}, V_G = -10V, N_d = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 以及改变  $Q_s$

图4 N沟 BCCD 中  $\phi_s \sim x_1$  的关系

$d = 0.15\mu, V_G = 0, Q_s = 0, N_d = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  
注入剂量  $d_s = 5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}, 7.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}, 1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$

图6 P沟 BCCD 中  $\phi_m, \phi_s \sim N_s$  的关系

$Z_1 = \frac{2\mu}{\lambda_D}, h = \frac{0.3\mu}{\lambda_D}, V_G = -10V$   
 $N_d = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$

对原 406 组同志在讨论中给予的帮助表示感谢。在计算机计算过程中得到王文苍、刘盘泉、张洞宣、何乃明、傅志煌等同志的帮助,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] McKenna, D. J., Schryer, N. L. and Valden, K. H., *BSTJ*, **53**, 1581 (1974).
- [2] Kent, W. O., *BSTJ*, **52**, 1009 (1973).
- [3] Lees, A. W. and Ryan, W. D., *Solid-state Electronics*, **17**, 1163 (1974).

## A BCCD MODEL OF ONE DIMENSION AND ITS NUMERICAL ANALYSIS

Cui Chenglie

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences)