

表面栅静电感应晶体管沿沟道 中心线电势分布的解析分析

仲 玉 林* 亢 宝 位

(北京工业大学)

1982年3月18日收到

提 要

本文从表面栅静电感应晶体管(SIT)的基本物理模型出发,求出了沿沟道中心线的电势分布和沟道势垒高度的解析表达式。根据所得表达式具体计算了一个典型器件在不同栅源电压 V_{GS} 和漏源电压 V_{DS} 下的电势分布和势垒高度。其结果与1978年 J.L. Morenza 等人对同一器件用计算机数值分析所得的结果吻合较好。

本文给出了该种器件中势垒存在的物理模型,指出了表面栅与隐埋栅器件在势垒形成上的差别:表面栅器件中势垒的形成与源沟 n^+n 结有关;而隐埋栅器件势垒的形成与源沟 n^+n 结无关。

本文所得的解析表达式也表明,表面栅结构中势垒的出现需要沟道夹断一定的深度。这与1980年日本 J. Ohmi 用计算机数值分析所得结论是一致的。

本文所得的势垒高度的解析表达式可以作为进一步求解该种器件各电参数的解析表达式的基础。

一、引 言

该种器件的研究起始于1964年,1975年西沢润一首先命名为静电感应晶体管^[1]。它与普通的场效应晶体管不同,它具有类真空三极管的非饱和伏安特性。这种器件具有沟道短、低噪音、热稳定性好、线性好、无少子存贮效应等特点,特别适于功率晶体管和集成电路。

该种器件早期发展的结构是隐埋栅型的。西沢等人指出这种结构的SIT靠栅沟pn结的自建电势差 V_{bi} 或外加反向栅偏压 V_{GS} 使沟道夹断后,在沟道中存在着多子运动的势垒,它是决定器件性能的关键,并根据假定的势垒高度 $V_b(x_0)$ 与 V_{GS} 、 V_{DS} 的关系,定性地解释了类三极管特性的出现。1977年 K. Yamaguchi 作了二维计算机模拟分析,得到了沿沟道中心线电势分布及势垒高度的数值解^[2]。

近些年来又发展了表面栅结构SIT,它较之隐埋栅型SIT具有结构简单、栅电阻和栅源电容小等优点,更适于高频高速应用,尤其适于集成化。1978年法国 J. L. Morenza

* 现在辽宁大学物理系。

等^[3] 对这种结构进行了二维计算机数值分析, 得到沿沟道中心线的电势分布和势垒高度的数值解, 并由此计算了输出伏安特性. 1980 年日本 J. Ohmi^[4] 第一次用解析法求电势分布. 但他把沟道边界形状理想化为矩形, 且得到的电势分布是无穷级数解. 他得出结论: 当沟道长宽比 $L/W < 0.5$ 时, 即使自建电势差使沟道夹断, 沟道中心线也无势垒形成.

总之, 至今为止, 无论对隐埋栅或表面栅 SIT, 虽然都承认沟道中有势垒存在, 但都没有给出势垒形成的物理模型; 两种结构在势垒形成上的差异无人探讨; 关于电势分布和势垒高度的分析仅限于数值分析, 唯一的解析表达式是无穷级数, 况且所用边界条件过于简化, 以致此解无实用价值.

本文的目的是为了解决上述问题, 即从表面栅器件的物理模型出发, 分析工作机理, 求出沿沟道中心线的电势分布和势垒高度的解析表达式; 弄清表面栅和隐埋栅结构在势垒形成中的区别; 讨论利用势垒高度的解析表达式进一步求解 SIT 电参数解析表达式的可能性.

二、分析与公式

表面栅 SIT 的一般结构如图 1. 它是用普通平面工艺制造. 在高阻 n-Si 上进行 P 型杂质扩散形成栅区, 再进行 n⁺ 区扩散以便制造源欧姆接触. x_{jp} 、 x_{jn} 、 x'_{jn} 分别为 pn 结、n⁺p 结、n⁺n 结的结深. x 轴沿沟道中心线.

为了简化沿沟道中心线电势分布的计算, 作如下假设或简化:

- (1) 栅 pn 结为 p⁺n 单边突变结, 且耗尽层近似成立;
- (2) 栅扩散区截面为半圆形, 如图 2;
- (3) 栅条长度 (x 方向) 比沟道宽度 $2W$ 大得多, 电势计算可简化为二维的.

图 2 中 x_n 为 n⁺n 结的 n 侧过渡区宽度, O' 为 x 轴上 n⁺n 结过渡区边界的位置, N_A 、 N_D 、 N_{D1} 分别为 P 区、n 区、n⁺ 区杂质浓度, m_p 为栅区中心的间距.

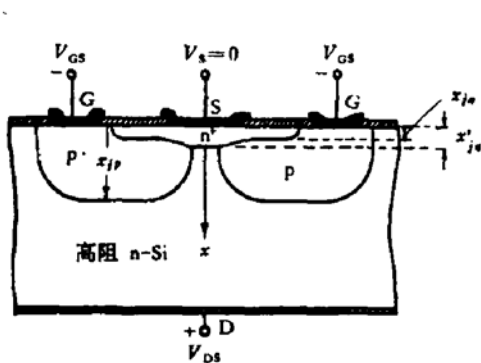


图 1 表面栅 SIT 的一般结构

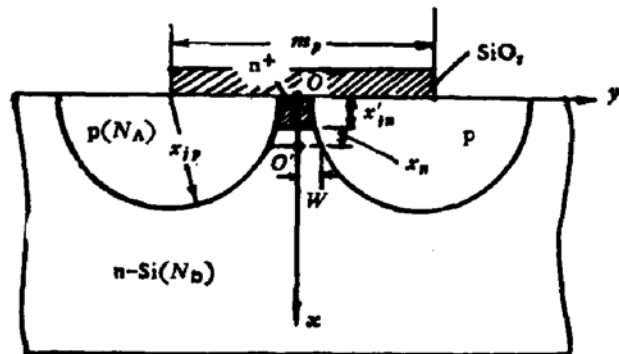


图 2 表面栅 SIT 结构的简化模型

一般说沿沟道中心线的电势分布 $V(x)$ 是 V_{GS} 和 V_{DS} 的函数, 即

$$V(x) = f(V_{GS}, V_{DS}). \tag{1}$$

另一方面 $V(x)$ 也与器件的结构参数和材料参数密切有关. 下面先考虑 $V_{DS} = 0$ 而

$V_{GS} \approx 0$ 的情况, 然后再考虑 V_{DS} 的作用。

(一) $V_{DS} = 0$ $V_{GS} \approx 0$ 时 $V(x)$ 的计算

当 $V_{DS} = 0$ 时, SIT 的栅 pn 结空间电荷区就能相互交叠使沟道中载流子耗尽。见图 3。P 为耗尽层边缘与 x 轴的交点。沿沟道中心线 $O'P$ 的电势分布由栅 pn 结耗尽层电荷 Q_A 、 Q_D' 和 n^+n 结 n^+ 侧的空间电荷 Q_{D3} 在 $O'P$ 上产生的电势的叠加来决定。图中示出的是一侧栅区所对应的电荷。如果画出电力线就很容易看出, 假若没有 n^+ 区存在, 仅仅两个半圆柱面 pn 结空间电荷区的重叠是不能形成电子沿 $O'x$ 方向运动的势垒的。高密度 n^+ 区电荷 Q_{D3} 的存在使电力线在靠近 O' 附近转向, 从而形成了电子沿 $O'x$ 方向运动的势垒。这就是表面栅 SIT 势垒形成的物理模型。注意到电荷 $Q_D' = Q_D - Q_{D1} - Q_{D2}$, 沟道中心线 $O'P$ 上任一点电位 $V(x)$ 为各部分电荷产生的静电势的叠加, 即

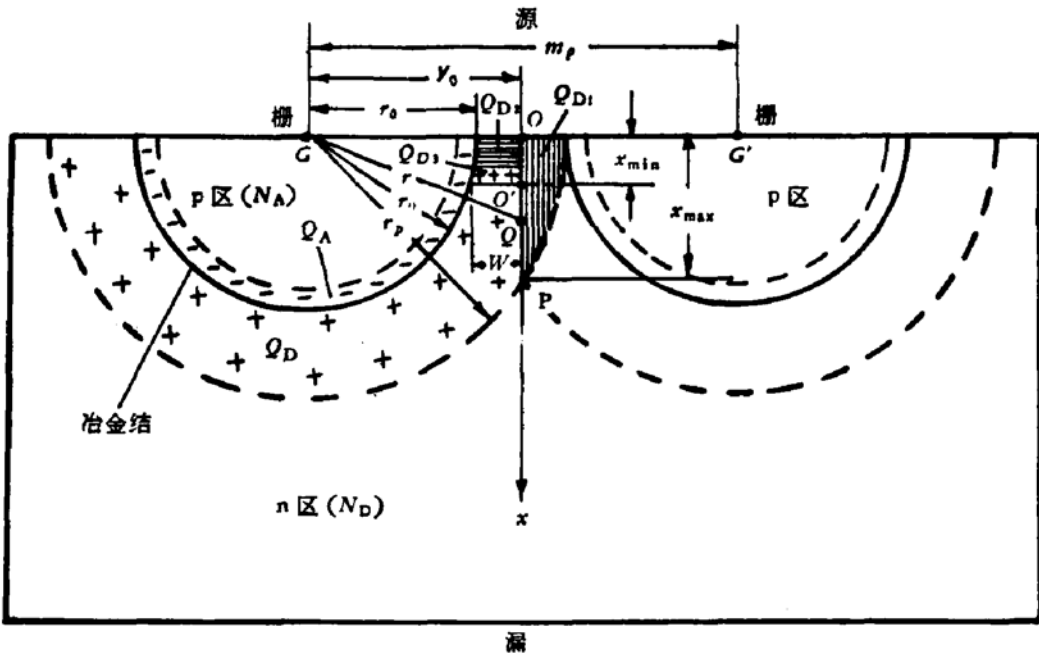


图 3 沿沟道中心线电位计算辅助图

$$V(x) = \phi_{10}(x) - \phi_{20}(x) - \phi_{30}(x) + \phi_D(x), \quad (2)$$

上式各项依序相应于电荷 Q_A 与 Q_D 、 Q_{D1} 、 Q_{D2} 、 Q_{D3} 产生的电势。其中 Q_D 为整个半圆柱形正空间电荷区的电荷, 即 $Q_D = -Q_A$ 。以下逐一说明和计算。

(1) $\phi_{10}(x)$: 它是整个半圆柱形栅 pn 结耗尽层电荷 Q_A 、 Q_D 在 $O'P$ 上产生的电势。参看图 (3)。设栅区冶金结半径为 r_0 , 其 n 区侧耗尽层的外半径为 r_p , 则单位长度 SIT 中栅耗尽层正、负电荷量为

$$Q_A = -Q_D = -qN_D\pi(r_p^2 - r_0^2)/2. \quad (3)$$

半圆柱形分布的电荷 Q_A 、 Q_D 产生的电势是很难计算的。为此, 作保角变换 $W = Z^2$, 把 Z 平面上的半圆柱形变为 W 平面上的整圆柱形。然后在 W 平面中利用高斯定理可以求出 E , 然后通过积分可计算出,

$$\varphi - \varphi_0 = (qN_D/4\epsilon)[r_p^2 \ln(r^2/r_0^2) + r_0^2 - r^2], \quad (4)$$

其中 φ 为 $O'P$ 上任一点 Q 的电势, r 为该点至栅中心线的距离, φ_0 为栅区的电势. ϵ 为硅的电容率. 计算中忽略了 P 区的电位降. 式 (4) 只是一个栅区电荷对 $O'P$ 上电位的贡献. 相邻两个栅区电荷在 $O'P$ 上产生的总电位应为式 (4) 的值加倍, 即

$$\varphi - \varphi_0 = \frac{qN_D}{2\epsilon} \left[r_p^2 \ln \left(\frac{y_0^2 + x^2}{y_0^2} \right) - x^2 \right], \quad (5)$$

式 (5) 已作了近似 $y_0 \cong r_0$. 若以 O' 点作电位参考点, 则 $O'P$ 上任一点的电势为 $\psi_{10}(x) = \varphi(x) - \varphi(x_{\min})$, 即

$$\psi_{10}(x) = \frac{qN_D}{2\epsilon} \left[r_p^2 \ln \left(\frac{x^2 + y_0^2}{x_{\min}^2 + y_0^2} \right) + x_{\min}^2 - x^2 \right], \quad (6)$$

其中 x_{\min} 为 O' 点的坐标, 且 $x_{\min} = x'_n + x_n$.

(2) $\psi_{20}(x)$: 由于栅沟 pn 结耗尽层向外扩展时在沟道中心线相遇后不能再向前扩展, $\psi_{10}(x)$ 计算中所考虑的耗尽层电荷 Q_D 中应去掉沟道中心线外侧的正电荷 Q_{D1} . 与 $\psi_{10}(x)$ 计算的方法一样, 作保角变换 $W = Z^2$, 在 W 平面上用积分方法求出 Q_{D1} , 再用高斯定理计算出电场 E , 进一步积分得到电位分布. 若以 O' 点为电位参考点, Q_{D1} 在 $O'P$ 上产生的电位的计算结果为:

$$\begin{aligned} \psi_{20}(x) = & - \frac{qN_D}{\pi\epsilon} \left\{ \frac{\pi}{4} (y_0^2 + x^2) - \frac{5y_0^2 + x^2}{2} \sin^{-1} \frac{y_0}{(y_0^2 + x^2)^{1/2}} \right. \\ & - \frac{\pi}{4} (y_0^2 + x_{\min}^2) + \frac{5y_0^2 + x_{\min}^2}{2} \sin^{-1} \frac{y_0}{(y_0^2 + x_{\min}^2)^{1/2}} \\ & \left. - \frac{x^2 y_0}{2(y_0^2 + x^2)^{1/2}} + \frac{x_{\min}^2 y_0}{2(y_0^2 + x_{\min}^2)^{1/2}} - \frac{x^3 y_0}{y_0^2 + x^2} + \frac{x_{\min}^3 y_0}{y_0^2 + x_{\min}^2} \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

(3) $\psi_{30}(x)$: 它是 Q_{D2} 产生的电势. 实际上这个区域为 n^+n 结的 n^+ 区和过渡区, 并无 Q_{D2} 存在, 但在 $\psi_{10}(x)$ 计算中已计入了它的作用, 故应去掉它的贡献. 将 Q_{D2} 分割为截面为 $x_{\min} dy$ 的许多无限长线电荷, 线电荷的位置近似认为位于 $x = x_{\min}$ 的平面上, 则用积分法可得到

$$\begin{aligned} \psi_{30}(x) = & - \frac{qN_D}{\pi\epsilon} x_{\min} \left\{ \frac{W}{2} \ln \frac{W^2 + (x - x_{\min})^2}{W^2} \right. \\ & \left. + (x - x_{\min}) \cos^{-1} \frac{(x - x_{\min})}{[W^2 + (x - x_{\min})^2]^{1/2}} \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

(4) $\psi_{D0}(x)$: 它是 n^+n 结 n^+ 侧耗尽层电荷 Q_{D3} 对电势分布的贡献. 单独的 n^+n 结空间电荷区本应正、负电荷数量相等. 但由于栅 pn 结耗尽层相互交叠使 n 区负电荷(电子)耗尽, 且使 n^+ 区正电荷分布发生变化. 这部分正电荷对电势的贡献在 $\psi_{10}(x)$ 中尚未计入, 应当补充上去.

用静电学知识可以判断出, Q_{D3} 的密度分布应当是在沟道中心处最小, 愈接近于 P 型栅区愈高. 为计算方便, 假定 Q_{D3} 的密度分布是 $|y|$ 的线性函数. 将 Q_{D3} 分割为宽度为 dy 的许多无限长的线电荷, 用积分的方法, 并利用静电场唯一性定理, 可以推出:

$$\psi_D(x) = -\beta \psi_{D0}(x), \quad (9)$$

其中

$$\beta = \frac{\psi_{10}(x_{\max}) - \psi_{20}(x_{\max}) - \psi_{30}(x_{\max})}{\psi_{D0}(x_{\max})}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \phi_{D0}(x) = & [W^2 + (x - x'_{jn})^2] \ln [W^2 + (x - x'_{jn})^2]^{1/2} - (W^2 + x^2) \ln (W^2 + x^2)^{1/2} \\ & + x_n^2 \ln x_n - (x - x'_{jn})^2 \ln (x - x_{jn}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$x_{\max} = (r_p^2 - y_0^2)^{1/2}. \quad (12)$$

x_{\max} 是 P 点的坐标。

将式 (6)、(7)、(8)、(9) 代入 (2), 就得到 $V_{DS} = 0$ $V_{GS} \approx 0$ 时沿沟道中心线 $O'P$ 的电势分布。显然它是 V_{GS} 、 N_D 、 W 、 N_A 等参量的函数。

(二) $V_{DS} \approx 0$ 、 $V_{GS} \approx 0$ 时的 $V(x)$

当同时加 V_{GS} 和 V_{DS} 时, 计算电势分布的方法同前, 只是有两点需修正:

(1) 等效的 r_p 值: r_p 为栅 pn 结耗尽层的外缘半径。由于 $V_{DS} \approx 0$, 源区附近栅 pn 结上的电压为 $V_{GS} + V_{bi}$, 而漏区附近为 $V_{GS} + V_{bi} - V_{DS}$ 。这样, 在源区附近和漏区附近 r_p 不相等。若取 $G'O$ 与 $G'O'$ 夹角之半处的耗尽层半径为等效耗尽层半径 r_p , 则可用几何学方法求出等效 r_p 为,

$$r_p = \frac{r_{p1}}{1 - \frac{r_{p2} - r_{p1}}{2 \sqrt{x_{\max}^2 + (r_{p1} - y_0)^2}} \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{\max}}{y_0}} \quad (13)$$

其中 r_{p1} 、 r_{p2} 分别为源处和漏区栅耗尽层半径, 分别由式 (4) 令 $\varphi - \varphi_0 = -(V_{GS} + V_{bi})$ 和 $-(V_{GS} + V_{bi} - V_{DS})$ 而得出, 即 $-(V_{GS} + V_{bi}) = (qN_D/4\epsilon)[r_{p1}^2 \ln(r_{p1}^2/r_0^2) + r_0^2 - r_{p1}^2]$ 和 $-(V_{GS} + V_{bi} - V_{DS}) = (qN_D/4\epsilon)[r_{p2}^2 \ln(r_{p2}^2/r_0^2) + r_0^2 - r_{p2}^2]$ 。

(2) $\phi_D(x)$ 的修正: 由于 $V_{DS} \approx 0$, 当取 O' 为电位参考点时, P 点电位应为 V_{DS} 。此时按以前相同的方法求 $\phi_D(x)$ 仍然可得到 (9) 式, 但其中 β 为,

$$\beta = \frac{\phi_{10}(x_{\max}) - \phi_{20}(x_{\max}) - \phi_{30}(x_{\max}) - V_{DS}}{\phi_{D0}(x_{\max})}. \quad (14)$$

将 $\phi_{10}(x)$ 中 r_p 的修正结果和 $\phi_D(x)$ 修正结果代入式 (2), 即得到 V_{GS} 和 V_{DS} 都不为零时沿沟道中心线电势分布。

(三) 公式的化简

为了实用方便公式 (2) 需要化简。化简的基本考虑是: (1) SIT 中漏极电流

$$I_{DS} = I_{DS0} \exp \left[-\frac{q}{kT} V_h(x_0) \right]^{[3]},$$

$V_h(x_0)$ 为势垒最高点的势垒高度。为了求 I_{DS} , 只要求出 $V_h(x_0)$ 即可; (2) 势垒最高点的位置 x_0 (常称本征栅) 一般均小于 y_0 , 故为求 x_0 附近电势垒分布可用 $x < y_0$ 作为简化条件; (3) 一般 $x_{\max} > y_0$, 故求 β 时用 $x_{\max} > y_0$ 作简化条件。用以上条件可把 $V(x)$ 在 x_0 附近的表达式近似为,

$$\begin{aligned} V(x) \approx & \frac{qN_D}{2\epsilon} \left[r_p^2 \ln \frac{y_0^2 + x^2}{y_0^2 + x_{\min}^2} - \frac{x^2}{2} - \frac{B}{(y_0^2 + x^2)^{1/2}} + A \right] \\ & + \beta \left\{ \frac{1}{2} [W^2 + (x - x'_{jn})^2] \times \ln [W^2 + (x - x'_{jn})^2] \right\} \end{aligned}$$

$$- (x - x_{nj})^2 \ln(x - x'_{jn}) + S \}, \tag{15}$$

其中

$$\beta = \frac{qN_D}{2\epsilon} \left\{ r_p^2 \ln \frac{x_{\max}^2 + y_0^2}{x_{\min}^2 + y_0^2} - \frac{x_{\max}^2}{2} - \frac{y_0}{\pi} \frac{2x_{\max}^2 + 5y_0^2}{(y_0^2 + x_{\max}^2)^{1/2}} - 2 \frac{y_0}{\pi} \frac{x_{\max}^3}{y_0^2 + x_{\max}^2} + C \right\} / \left\{ W^2 \ln(x_{\max} - x'_{jn}) + S + \frac{W^2}{2} \right\},$$

$$A = \frac{5}{\pi} \frac{y_0^3}{(x_{\min}^2 + y_0^2)^{1/2}} + \frac{1}{2} x_{\min}^2, \quad B = \frac{5}{\pi} y_0^3,$$

$$S = x_n^2 \ln x_n - (W^2 + x_n^2) \ln(W^2 + x_n^2)^{1/2}, \quad C = \frac{5y_0^2 + x_{\min}^2}{\pi} \sin^{-1} \frac{y_0}{(y_0^2 + x_{\min}^2)^{1/2}}.$$

沟道势垒高度 $V_A(x_0)$ 应为

$$V_A(x_0) = -V(x_0). \tag{16}$$

(四) 解析式与数值解的比较

为了验证本文推出结果的精确性, 计算了 J. L. Morenza 等^[3]所用样管的电势分布和势垒高度, 并与他们所得到的计算机数值解进行了比较, 二者吻合较好.

样管的剖面图如图 1, 各参数如下: 栅区表面杂质浓度 $N_{As} = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, n^+ 区表面浓度 $N_{Ds} = 1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, $N_D = 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $x_{jp} = 9 \mu\text{m}$, $x_{jn} = 2 \mu\text{m}$, $m_p = 2y_0 = 18 \mu\text{m}$, 侧向扩散结深 y_{jp} 为体内结深 x_{jp} 的 0.9 倍. 利用上述样管参数可以求得 $x'_{jn} = 3.195 \mu\text{m}$, $x_n = 0.430 \mu\text{m}$, $x_{\min} = x'_{jn} + x_n = 3.625 \mu\text{m}$, $W = y_0 - (y_{jp}^2 - x_{\min}^2)^{1/2} = 1.557 \mu\text{m}$; 将以上参数代入式 (2)、(15) 和 (16), 得到的不同 V_{GS} 和 V_{DS} 时的沟道中心线电势分布

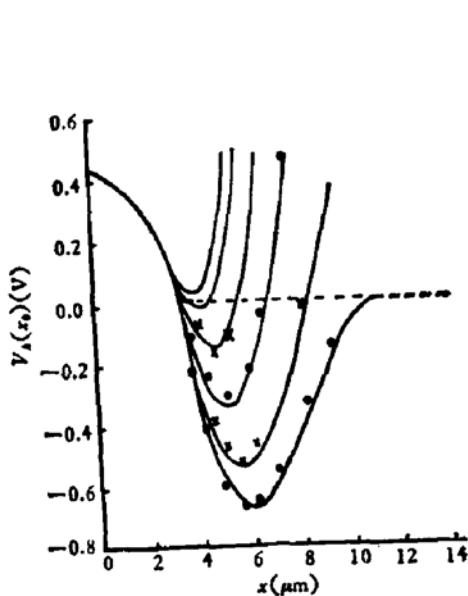


图 4 $V_{GS} = -3V$ 时不同 V_{DS} 下沟道中心线电势分布
 × · 解析解, 本文式 (2)
 — 数值解, 文献 [3]

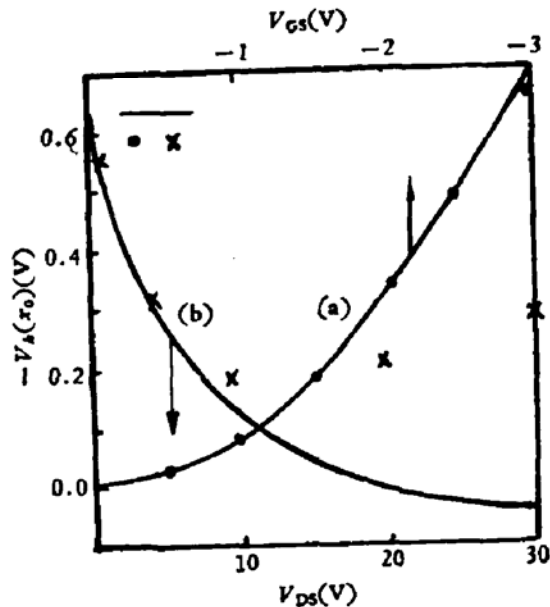


图 5
 (a) 沟道势垒高度与 V_{GS} 关系 ($V_{DS} = 0$) (b) 沟道势垒高度与 V_{DS} 关系 ($V_{GS} = -3V$)
 · × 本文公式 (2) — 数值解, 文献 [3]

和势垒高度如下:

(1) $V_{GS} = -3V$ 时不同 V_{DS} 下沿沟道中心线 $O'x$ 的电势分布见图 4;

(2) $V_{DS} = 0$ 时不同 V_{GS} 下沟道势垒高度 $V_A(x_0)$ 和本征栅位置 x_0 见表 1 与图 (5) 曲线 (a);

(3) $V_{GS} = -3V$ 时不同 V_{DS} 下沟道势垒高度 $V_A(x_0)$ 和本征栅位置 x_0 见表 2 与图 5 曲线 (b).

在计算中需要用到 r_0 . 因为 $x_{ip} \approx y_{ip}$, 栅 pn 结不是严格的圆柱面, 半径 r_0 不是常数. r_0 应取平均值. 因此, 根据沟道中耗尽区长度 $O'P$ 的大小不同取的 r_0 值略有不同, 即 $|V_{GS}|$ 较大时耗尽区向下延伸, 应取的 r_0 值较大. 在表 1、2 中给出了所取的 r_0 值.

表 1 $V_{DS} = 0$ 时本征栅位置和沟道势垒高度

$V_{GS}(V)$	0	-0.5	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	注
r_0/x_{ip}	0.90	0.90	0.90	0.91	0.93	0.94	0.94	
$x_0(\mu m)$		5.1	5.2	5.3	5.5	5.6	5.8	
$V_A(x_0)(V)$	0	0.018	0.085	0.188	0.341	0.498	0.642	式(2)
$V_A(x_0)(V)$				0.264	0.346	0.477	0.577	式(15)

表 2 $V_{GS} = -3V$ 时不同 V_{DS} 下的本征栅位置与势垒高度

$V_{DS}(V)$	1	4	10	20	30	注
r_0/x_{ip}	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	
$x_0(\mu m)$	5.7	4.9	4.6	4.5	4.5	
$V_A(x_0)(V)$	0.563	0.304	0.197	0.219	0.293	式(2)
$V_A(x_0)(V)$	0.503	0.295	0.198			式(15)

各图中也给出了文献 [3] 的计算机数值分析结果, 以示比较. 除 $V_{DS} > 10V$ 的情况外(将在下面讨论), 其它情形下本文的解析式计算结果与 J. L. Moreza 的数值分析结果吻合都较好.

表 3 各部电荷对沟道电势的贡献 ($V_{GS} = -3V$ $V_{DS} = 4V$)

$x(\mu m)$	$\phi_{10}(x)(V)$	$\phi_{20}(x)(V)$	$\phi_{30}(x)(V)$	$\phi_D(x)(V)$	$V(x)(V)$	注
3.9	0.324	0.194	0.072	-0.662	-0.071	
4.4	0.944	0.524	0.182	-1.887	-0.237	
4.9	1.593	0.825	0.270	-2.992	-0.304	势垒最高点
5.4	2.261	1.099	0.340	-3.948	-0.248	
6.0	3.074	1.397	0.409	-4.927	-0.047	
7.0	4.417	1.831	0.497	-6.252	+0.494	

为了更清楚地说明沟道势垒形成的物理模型, 将电势分布中 $\phi_{10}(x)$ 、 $\phi_{20}(x)$ 、 $\phi_{30}(x)$ 、 $\phi_D(x)$ 的贡献列于表 3, 以便了解各部分电荷对电势的作用的相对大小及它在势垒形成

中的作用。各项贡献中以 $\phi_{10}(x)$ 、 $\phi_{20}(x)$ 、 $\phi_D(x)$ 较大。尤其是唯 $\phi_D(x)$ 才能使 $V(x)$ 成为负的,即 n^+n 结的 n^+ 区电荷是形成沟道势垒的决定因素。

三、讨 论

(1) 本文推出的计算电势分布的解析公式所计算的样管的沿沟道中心线电势分布以及沟道势垒高度与偏压 V_{GS} 、 V_{DS} 的关系都与 J. L. Morenza 的数值分析结果很好符合(见图 4、5),这说明本文提出的势垒形成的物理模型和数学近似处理是正确的。

(2) $V_{DS} > 10V$ ($V_{GS} = -3V$) 时本文推出公式的计算结果与数值解偏离较大(图 5)。由图 4 知此时沟道势垒高度已降到仅 $0.2V$ 左右,此时沟道电流很大,运动着的载流子密度较高,本文所作的耗尽层近似的假定已不成立,因而所推公式已不适用。但这不影响本文结果分析 SIT 特性的价值,因为沟道势垒很低时势垒对沟道电流的限制不是主要的,沟道电流主要由漂移运动区电阻决定。这时应当用普通 JFET 的理论,而不是用 SIT 的理论去处理。在这样低(仅 $10V$)的漏源电压下势垒就几乎降到了 0 的原因是该样管的结构所决定。它在 $V_{GS} = -3V$ 时的起始势垒很低。(此管在 $V_{GS} = 0V$ 时沟道无势垒,如图 4 虚线表示)一般 SIT 结构中势垒要高得多。

(3) 结果证明,本文对栅区形状所作的半圆柱形简化是合适的。在实际器件中栅 pn 结的侧面形状很接近于圆柱形,而沟道中心线电势分布基本上由栅 pn 结侧面区的电荷分布决定。pn 结下部前沿虽是平坦的,与圆柱形假设相去甚远,但它对沟道中心线的电势分布影响不大。

(4) 文献 [4] 中曾指出,只有沟道长宽比 $L/W \geq 0.5$ 时才可能有沟道势垒出现。否则,即使耗尽层把沟道夹断也不能形成势垒。对本文分析的样管,在 $V_{GS} = 0$ $V_{DS} = 0$ 时沟道已被耗尽层夹断,可以算出此时 $x_{max} = 7.22\mu m$, $x_{min} = 3.625\mu m$ $W = 1.557\mu m$, $L \cong x_{max} - x_{min} = 3.595\mu m$, $L/W = 2.3$ 。但此时并无沟道势垒出现(见表 1)。假设调整 m ,使 $W = 1\mu m$,即 $L/W \cong 3.6$,根据公式 (2) 可计算出 $V_A(x_0) = 0.13V$,沟道势垒开始出现。本文与文献 [4] 的定性结论相同。至于开始出现势垒的 L/W 的具体数值不同,可能是样管的结构不同。

四、结 论

(1) 本文提出的 SIT 沟道势垒形成的物理模型是正确的,近似的数学处理是妥当的。所得的公式 (2) 可用来较精确地计算沿沟道中心线电势分布和势垒高度,近似公式 (16) 可用于近似计算沟道势垒高度。

(2) SIT 沟道中确实存在多子运动的势垒。其形成机理是:它是在 V_{bi} 和 V_{GS} 作用下两侧栅 pn 结耗尽层向沟道扩展、相互发生重叠后电力线弯曲的自然结果,由耗尽层电荷作用的叠加可以精确决定势垒高度。在表面栅 SIT 中源 n^+n 结的 n^+ 侧正电荷是形成势垒的关键因素,而隐埋栅 SIT 中势垒的形成并不必须有 n^+n 结存在,这是两者在势垒形成机理上的差别。加 V_{GS} (负的)使耗尽层重叠程度更甚,因而使势垒增高;而 V_{DS} 附加了

一个从漏向源的电场,使势垒降低,并使本征栅位置 x_0 向源移动。

(3) 只有栅 pn 结势垒交叠到一定程度后,即 L/W 大于一定值时势垒才会出现。但势垒出现时的 L/W 判据值本文结果与文献 [4] 不同,尚待进一步研究。

(4) 本文所得势垒高度解析式可作为进一步解析分析 SIT 电参量 (I_{DS} 、 μ 等) 的基础。

参 考 文 献

- [1] J. I. Nishizawa, *IEEE Trans. on Electron. Devices*, ED-22, 185(1975).
- [2] K. Yamaguchi, *ibid*, ED-24, 1061 (1977).
- [3] J. L. Morenza, and D. Estéve, *Solid-St. Electron.*, 21, 739 (1978).
- [4] T. Ohmi, *IEEE Trans. On Electron. Devices*, ED-27, 536 (1980).

Analytical Solution along the Central Line of the Channel in the Surface-Gate SIT

Zhong Yulin and Kang Baowei

(Beijing Polytechnical University)

Abstract

Starting from the fundamental physical model of the surface-gate SIT, the analysis is made for the operational mechanism of this device, the analytical solution is obtained along the central line of the channel. The distributions about the potential barrier is computed at different V_{GS} and V_{DS} with the typical device. The result is compared with the numerical result which had been achieved with the same device by J. L. Morenza and D. Esteve in 1978, and it is found that both are consistent.

The physical model about the existence of potential barrier in the surface-gate SIT is described and the difference in the forming of potential barrier between the surface-gate SIT and buried-gate SIT is explained. The conclusion is made about the existence of potential barrier.