

声电输运器件的沟道特性研究*

邹英寅 凌明芳 陈抗生

(浙江大学, 杭州, 310008)

1990年12月12日收到.

为实现砷化镓声电输运, 必须在外延层中建立电子输运沟道。本文对金属-n型外延层-半绝缘衬底结构的输运沟道给出耗尽分析的解析表达式, 分析了外延层厚度、掺杂浓度、偏置电压等参数对输运沟道耗尽特性的影响, 以及器件表面存在氧化层时对器件工作特性的影响。

EEACC: 2860C, 2560S, 2560B

一、引言

声电输运器件 (ACT 器件) 是一类可用于高速信号处理的砷化镓电荷转移器件^[1]。ACT 器件的结构和工作原理都有点类似于传统的电荷耦合器件 (CCD), 但有一个明显不同点, 即由在砷化镓中传播的声表面波所建立的行波电场代替了 CCD 中复杂的时钟驱动电路。在 ACT 器件中, 电荷包被这一理想的“时钟”位阱以声同步速度连续地输运, 不存在因栅结构而引起的沟道电位变化, 是一种理想的行波 CCD。时钟信号的连续特性, 外延砷化镓中电子的高迁移率, 以及对输入信号的自动抽样使得 ACT 器件具有高的传输效率和高速信号处理能力。已经利用 ACT 技术实现了很多信号处理器件, 如延迟线, 横向滤波器, 模拟存储器, 卷积器和相关器等^[2,3]。

砷化镓 ACT 器件是一种埋沟型多数载流子器件。要实现 ACT 原理, 必须获得自由载流子完全耗尽的沟道, 以避免载流子对声表面波建立的行波电场在沟道传播过程中的屏蔽, 同时降低本底噪声信号。早期的 ACT 器件是 Schottky-N-P 结构沟道, 它在完全耗尽状态下的电位分布已经研究过了^[4]。现在实用的器件是 Schottky-N 结构的 ACT 器件, 它是一种完全平面结构的器件, 易于和 GaAs IC 相集成^[5]。ACT 器件的输运沟道类似于一只很长栅的 MOSFET, 在传播方向的电位分布是声表面波所产生的均匀行波场, 因此, 无需解二维方程就可得到沟道耗尽电位的解析表达, 它具有简洁、直观、物理概念清晰的特点。本文用该模型分析了 Schottky-N 结构的 ACT 器件沟道耗尽特性与外延层厚度, 掺杂浓度, 偏置电压等因素的关系, 以及由于工艺原因在半导体表面引入氧化层后沟道特性的变化。

分析结果表明, 发生完全耗尽时的阈值电压强烈依赖于掺杂浓度, 最大耗尽电位位置由掺杂浓度和栅电压所决定。而当半导体表面存在氧化层时, 沟道必须在加上足够的背景偏置时才能达到耗尽, 但对电荷输运能力仍是不利的。

* 本课题为国家自然科学基金和机电部预研基金资助项目。

二、耗尽工作原理

图1为一典型ACT器件输运沟道的结构示意图，在掺铬半绝缘砷化镓上外延生长一层厚度约为半个声表面波长的n型砷化镓，再在表面淀积一层金属层，当在金属和衬底加上适当的电压 V_G 和 V_{BS} 时，就构成了一个声电输运沟道。对外延层-衬底界面特性的研究表明^[6]，通过电子和空穴对深度陷阱的填充和倒空而在衬底中建立起负空间电荷区，从而可以使n型沟道耗尽。为了计算耗尽电位，可以把衬底处理为它所具有的受主浓度粗略等于体材料中未被占据的深度陷阱密度 N_s 。掺Cr半绝缘衬底中陷阱密度约为 10^{13} cm^{-3} 。

由于金属和半导体的功函数不同，它们之间有一平带电位 V_{FB} ，而在n型外延层和半绝缘衬底间存在一势垒 V_{bi} 。当金属表面所加电压 V_G 满足 $V_G - V_{FB} < V_{ch} + V_{bi}$ 时(V_{ch} 为沟道电位)，沟道处于表面耗尽状态。当 $V_G = V_{ch}$ 时，整个沟道达到完全耗尽。

如果金属与半导体之间存在氧化层，当 V_G 进一步减小时，衬底中的空穴就有可能被抽取到表面，如果氧化层-半导体界面的电位足够负，表面处的空穴浓度将超过n型半导体的掺杂浓度，从而使器件表面达到反型，使得表面波电场被屏蔽，同时这些空穴将引起噪声电流。而在金属-半导体结构中，这些空穴将由金属中的电子所补偿。

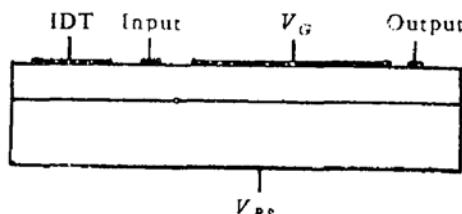


图1 输运沟道示意图

三、沟道电位分布模型

1. 部分耗尽

在 $V_G - V_{FB} < V_{ch} + V_{bi}$ 而未达到完全耗尽时，器件可分为以下几个区域(图2)：

表面耗尽区： $0 \leq x < x_i$

未耗尽沟道区： $x_i \leq x < x_n$

n型空间电荷区： $x_n \leq x < x_i$

衬底空间电荷区： $x_i \leq x < x_b$

体内： $x_b \leq x < \infty$

泊松方程：

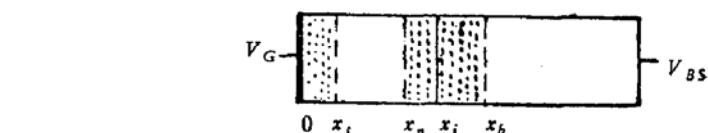


图2 部分耗尽模型

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}. \quad (1)$$

所满足的边界条件为

$$\left. \psi(x) \right|_{x=0} = V_G - V_{FB} \quad (2(a))$$

$$\left. \psi(x) \right|_{x=x_i^-} = \left. \psi(x) \right|_{x=x_i^+} \quad (2(b))$$

$$\left. \psi(x) \right|_{x=x_n^-} = \left. \psi(x) \right|_{x=x_n^+} \quad (2(c))$$

$$\left. \psi(x) \right|_{x=x_i^-} = \left. \psi(x) \right|_{x=x_i^+} \quad (2(d))$$

$$\left. \psi(x) \right|_{x=x_b} = V_{BS} \quad (2(e))$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s E(x)|_{x=x_i^-} = \sigma_s E(x)|_{x=x_i^+} \\ \sigma_n E(x)|_{x=x_n^-} = \sigma_n E(x)|_{x=x_n^+} \\ \sigma_s E(x)|_{x=x_i^-} = \sigma_s E(x)|_{x=x_i^+} \\ \sigma_n E(x)|_{x=x_b^-} = \sigma_n E(x)|_{x=x_b^+} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 3(a) \\ 3(b) \\ 3(c) \\ 3(d) \end{array}$$

在沟道区域内,净电荷为零,沟道内电位分布为一常数 ϕ_{ch} ,而电场则为零。即

$$\left\{ \begin{array}{l} E(x) = 0 \\ \phi(x) = \phi_{ch} \end{array} \right. \quad x_i < x < x_n \quad (4)$$

而 $\phi_{ch} = V_{ch} + V_{bi}$, V_{ch} 为加在沟道上的偏置电压。

利用边界条件(2)、(3)和(4),在五个区域内解泊松方程(1),可得各区域内的电位分布为:

$$\phi(x) = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_s} (x - x_i)^2 \quad 0 \leq x \leq x_i, \quad (5)$$

$$\phi(x) = \phi_{ch} \quad x_i < x \leq x_n, \quad (6)$$

$$\phi(x) = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_n} (x - x_n)^2 \quad x_n < x \leq x_b, \quad (7)$$

$$\phi(x) = \frac{qN_i}{2\sigma_i} (x_b - x)^2 + V_{BS} \quad x_b < x \leq \infty, \quad (8)$$

$$\phi(x) = V_{BS} \quad x_b < x < \infty, \quad (9)$$

其中

$$\phi_{ch} = V_{ch} + V_{bi} \quad (10)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_i N_D}{n_i^2} \right) \quad (11)$$

$$x_n = x_i - \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} \left(\frac{N_i}{N_D + N_i} \right) (\phi_{ch} - V_{BS}) \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$x_b = x_i + \frac{N_D}{N_i} (x_i - x_n) \quad (13)$$

$$x_i = \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} (\phi_{ch} - V_G + V_{PB}) \right]^{1/2} \quad (14)$$

2. 完全耗尽

随着 V_G 的进一步减小, x_i 将不断增大,当 V_G 降至 $V_G = V_{th}$ 时, x_i 将与 n 型空间电荷区相接而达到 n 型外延层的完全耗尽(图 3)。

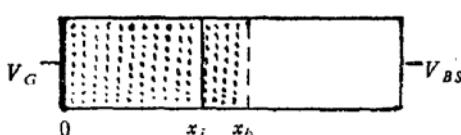


图 3 完全耗尽模型

此时,器件可分为以下几个区域:

耗尽区: $0 < x \leq x_i$

衬底空间电荷区: $x_i < x \leq x_b$

体内: $x_b < x < \infty$

边界条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(x)|_{x=0} = V_G - V_{PB} \\ \phi(x)|_{x=x_i^-} = \phi(x)|_{x=x_i^+} \end{array} \right. \quad 15(a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(x)|_{x=x_i^-} = \phi(x)|_{x=x_i^+} \\ \phi(x)|_{x=x_b} = V_{BS} \end{array} \right. \quad 15(b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(x)|_{x=x_b} = V_{BS} \end{array} \right. \quad 15(c)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s E(x)|_{x=x_i^-} = \sigma_s E(x)|_{x=x_i^+} \\ \sigma_s E(x)|_{x=x_b} = 0 \end{array} \right. \quad 16(a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s E(x)|_{x=x_i^-} = \sigma_s E(x)|_{x=x_i^+} \\ \sigma_s E(x)|_{x=x_b} = 0 \end{array} \right. \quad 16(b)$$

利用边界条件(15)、(16)解泊松方程,可得各区域的电位分布为:

$$\phi(x) = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_s} (x - x_i)^2 \quad 0 \leq x \leq x_i \quad (17)$$

$$\phi(x) = \frac{qN_s}{2\sigma_s} (x_b - x)^2 + V_{Bs} \quad x_i \leq x \leq x_b \quad (18)$$

$$\phi(x) = V_{Bs} \quad x_b < x < \infty \quad (19)$$

其中

$$\phi_{ch} = \left(\frac{N_D + N_s}{N_D} \right) \left[\left(V_G - V_{FB} + V_i - V_{Bs} + \frac{V_{eff}}{4} \right)^{1/2} - \frac{\sqrt{V_{eff}}}{2} \right]^2 + V_{Bs} \quad (20)$$

$$V_i = \frac{qN_D x_i^2}{2\sigma_s} \quad (21)$$

$$V_{eff} = \frac{2qN_s x_i^2}{\sigma_s} \quad (22)$$

$$x_i = x_i - \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} \left(\frac{N_s}{N_s + N_D} \right) (\phi_{ch} - V_{Bs}) \right]^{1/2} \quad (23)$$

$$x_b = x_i + \frac{N_D}{N_s} (x_i - x_t) \quad (24)$$

在 $x = x_i$ 处, 可得到电位最大值

$$\phi_{max} = \phi_{ch} \quad (25)$$

而恰好达到沟道完全耗尽时的电压 $V_G = V_{th}$ 可令式(14)和(12)中的 $x_n = x_i$ 得到, 即

$$x_i = \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} \left(\frac{N_s}{N_s + N_D} \right) (\phi_{ch} - V_{th}) \right]^{1/2} = \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} (\phi_{ch} - V_{th} + V_{FB}) \right]^{1/2} \quad (26)$$

在沟道零偏置情况下, 即 $V_{ch} = 0$ 时(声电输运器件的一般工作状态), 可解得

$$V_{th} = V_{Bi} + V_{FB} - \frac{qN_D}{2\sigma_s} \left\{ x_i - \left[\frac{2\sigma_s}{qN_D} \left(\frac{N_s}{N_s + N_D} \right) (V_{Bi} - V_{Bs}) \right]^{1/2} \right\}^2. \quad (27)$$

3. 氧化层的影响

令氧化层位于 $-x_{0x} < x < 0$ 区域, 则在 $V_G < V_{TI}$ (V_{TI} 为发生反型时的外加偏压) 时, 耗尽分析完全类似于没有氧化层的情况。

在部分耗尽时, 沟道中的电位分布为

$$\phi(x) = V_G - V_{FB} - E_{0x}(x + x_{0x}) \quad -x_{0x} \leq x < 0 \quad (28)$$

$$\phi(x) = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_s} (x - x_i)^2 \quad 0 \leq x < x_i \quad (29)$$

$$\phi(x) = \phi_{ch} \quad x_i \leq x < x_n \quad (30)$$

$$\phi(x) = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_s} (x - x_n)^2 \quad x_n \leq x < x_i \quad (31)$$

$$\phi(x) = \frac{qN_s}{2\sigma_s} (x_b - x)^2 + V_{Bs} \quad x_i \leq x < x_b \quad (32)$$

$$\psi(x) = V_B, \quad x_b < x < \infty \quad (33)$$

其中

$$E_{0x} = -\frac{qN_D}{\sigma_0 x} x_i \quad (34)$$

$$x_i = \left[\frac{2\sigma_i}{qN_D} (\phi_{ch} - V_G - V_{FB}) + \left(\frac{\sigma_i x_{0x}}{\sigma_0 x} \right)^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{\sigma_i x_{0x}}{\sigma_0 x} \right) \quad (35)$$

ϕ_{ch} , x_i , x_b 的定义与三·1 节中相同。

器件处于反型状态时, 表面电位

$$\psi(x)|_{x=0} = \phi_{ch} = \phi_{inv} \quad (37)$$

ϕ_{inv} 由于空穴在表面积累而导致。在平衡状态下, 处于表面的空穴浓度 p_s 为

$$p_s = N_s e^{-\frac{q}{kT} (\phi_s - V_{FB})}$$

即

$$\phi_{inv} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_s}{N_D} \right) + V_{FB} \quad (38)$$

由 $x = 0$ 处 ψ 连续可得

$$\phi_s = \phi_{ch} - \frac{qN_D}{2\sigma_i} x_i^2 \quad (39)$$

由式(35)和(39)可解出

$$V_{TI} = V_G = V_{FB} + \phi_{inv} - \frac{x_{0x}}{\sigma_0 x} [2q\sigma_i N_D (\phi_{ch} - \phi_{inv})]^{1/2} \quad (40)$$

因此, 如果 $V_{TI} > V_{th}$, 器件将在耗尽前就达到反型, 从而器件将不可能实现电荷输运所需的完全耗尽沟道。

四、数值模拟结果和讨论

1. 阈值电压变化特性

图 4 为不同外延层厚度下, 沟道完全耗尽时的阈值电压 V_{th} 随外延层掺杂浓度的变化。与我们所预计的一样, $|V_{th}|$ 随 N_D 的增大而增大, 随外延层厚度增加而增加。

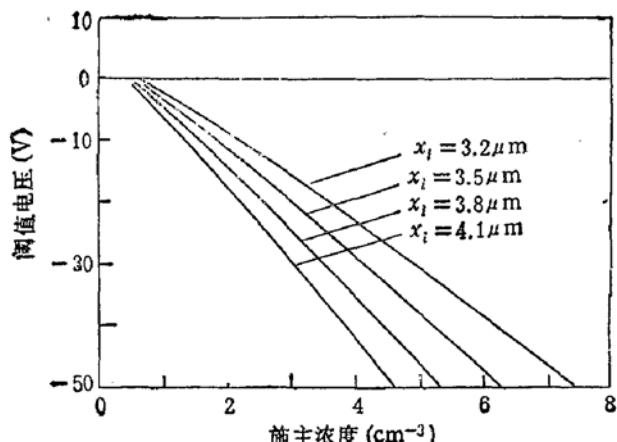


图 4 无氧化层时, 耗尽阈值电压与外延层参数关系

图 5 和图 6 为表面存在氧化层时, 阈值电压的变化特性。衬底偏置的效果是明显的。在不加 V_B 时, 发生反型的电压 V_{TI} 远远大于达到沟道完全耗尽所需的电压 V_{th} , 因此沟道不可能达到完全耗尽。当 $V_B = -8\text{V}$ 时, 在低掺杂浓度下仍可以实现沟道完全耗尽 (图 6)。

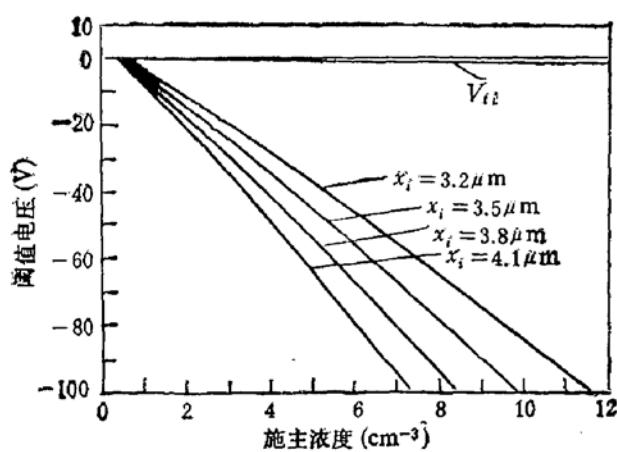


图5 有氧化层时, V_{th} , V_{TI} 特性
($V_{B_s} = 0\text{V}$)

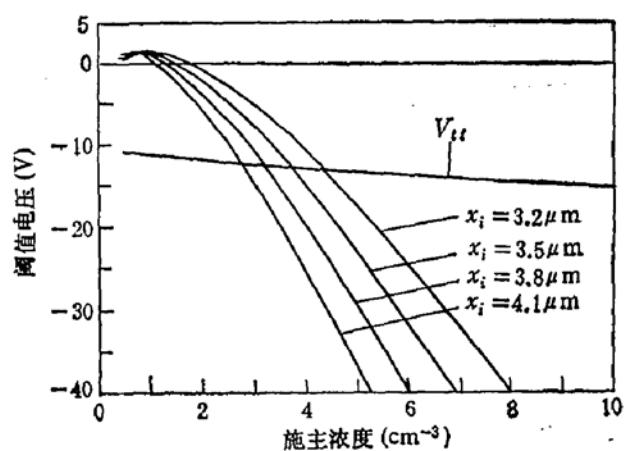


图6 有氧化层时, V_{th} , V_{TI} 特性
($V_{B_s} = -8\text{V}$)

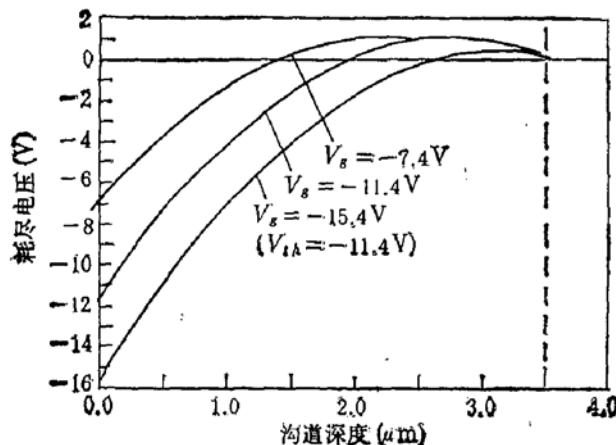


图7 无氧化层沟道耗尽电位分布
 $x_i = 3.5 \mu\text{m}$, $N_d = 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$

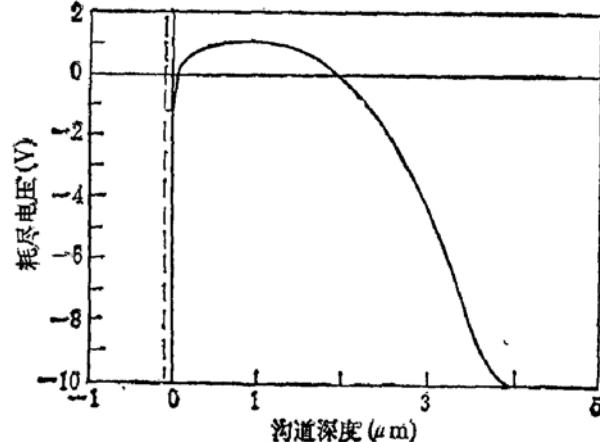


图8 有氧化层时沟道耗尽电位分布
 $x_{ox} = 0.1 \mu\text{m}$ $x_i = 3.5 \mu\text{m}$ $N_d = 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 $V_{B_s} = -10\text{V}$

2. 耗尽电位分布

图7为无氧化层输运沟道的耗尽电位分布图,当 $V_G > V_{th}$ 时(即未达到完全耗尽),曲线有一段平坦区,它对应于未耗尽区的电位分布,而在外延层与衬底处的凸起峰,是由界面内建电场引起. 耗尽电位的最大值出现在界面附近.

图8为有氧化层时,在完全耗尽条件下的沟道电位分布,可见耗尽电位最大值向表面移动.

3. 耗尽宽度特性

图9为完全耗尽状态下,最大沟道电位位置随所加电压的变化. 掺杂浓度的影响是明显的.

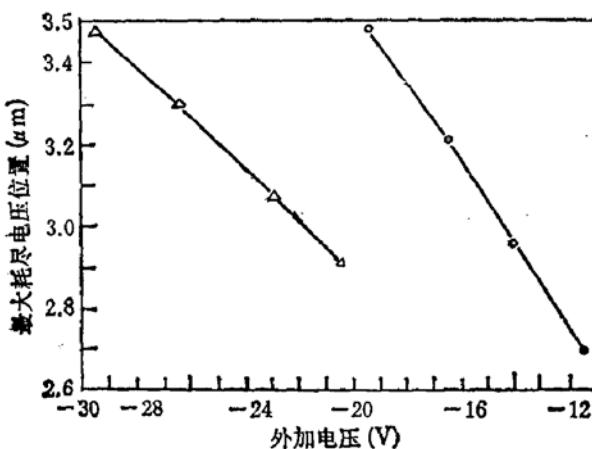


图9 最大耗尽电位位置变化曲线
○ $N_d = 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$; △ $N_d = 3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$

对 ACT 器件来说,最大耗尽电位的位置是很重要的。对于在沟道中传播的表面波来说,表面存在的导体屏蔽了表面的电位,但由于砷化镓的压电效应,在沟道内会很快地恢复起来,并在离表面约 0.4λ (λ 为声表面波波长) 处达到最大值^[7]。所以为了有效地实现 ACT 原理,耗尽电位的最大值必须与声表面波电位最大值相重合或接近。氧化层显然不满足该条件。

五、结语

本文分析了 Schottky-N 结构 ACT 器件输运沟道的耗尽特性,给出了沟道电位分布的表达式。可以看出在制造过程中如果留有氧化层,将严重影响器件的正常工作。对一声表面波频率为 360MHz 的声电输运器件,当沟道加上 $-11V$ 的电压 V_G 时,最大耗尽电位位于 $x = 3.2\mu m$ 处。实际器件是 $V_G = -6V$, 衬底加偏压 $V_B = -10V$, 实际加在外延层-衬底界面上的压降为 $4V$ 左右,误差是由于在分析过程中未考虑在衬底上的压降所引起。

砷化镓声电输运器件是一类新型高速信号处理器件,由于其与 GaAs 集成电路具有良好的工艺兼容性,正在飞速的发展。最新的可编程抽头滤波器,其运算速度高达每秒 2×10^{10} 次乘法和加法运算^[8]。

参 考 文 献

- [1] M. J. Hoskins, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 4, 332 (1982).
- [2] 邹英寅,陈抗生,凌明芳,微波学报, **21**, 1, (1990).
- [3] R. J. Kancy, et al., *Microwave J.*, **31**, 11, 141 (1988).
- [4] M. J. Hoskins, et al., *J. Appl. Phys.*, **55**, 2, 413 (1984).
- [5] B. J. Hunsinger, 1990 IEEE MTT-s Proc., 1099(1990).
- [6] I. Deyhimy, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 6, 387 (1978).
- [7] 浙江大学电子物理技术研究所,“声电输运器件研究报告”,1990.
- [8] R. W. Miller, et al., 1990 IEEE MTT-s Proc., 1111(1990).

Study on Channel Characteristics of Acoustic Charge Transport Devices

Zou Yingyin; Ling Mingfang and Chen Kangsheng
(Zhejiang University, Hangzhou, 310008)

Abstract

This paper gives an analytical formula of channel depletion for a metal/n-type GaAs/semi-insulate GaAs structure. The effects of channel parameters, such as epitaxy layer thickness, doping density, gating voltage, as well as surface oxide layer, on channel depletion characteristics are studied. The developed model can be used for device design.

EEACC: 2860C, 2560S, 2560B